

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA INFORMÁTICA PARA O DIMENSIONAMENTO DE EQUIPAMENTO DE PROCESSAMENTO DE MINÉRIOS

FLÁVIO CÉSAR PINTO RODRIGUES

Dissertação submetida para satisfação dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA DE MINAS E GEO-AMBIENTE

Orientador: Professora Aurora Magalhães Futuro da Silva

Coorientador: Professor Mário Rui Machado Leite

NOVEMBRO DE 2019

MESTRADO EM ENGENHARIA DE MINAS E GEO-AMBIENTE 2018/2019

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MINAS

Tel. +351-22-041 3163

Fax +351-22-041 3164



minas@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Minas e Geo-Ambiente - 2018/2019 - Departamento de Engenharia de Minas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2019.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

AGRADECIMENTOS

Concluído o meu percurso académico na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, com a entrega desta dissertação final, cabe-me agradecer a um conjunto de pessoas que permitiram que todo o meu percurso pudesse ficar para sempre marcado na minha memória com tão bons momentos de aprendizagem, partilha de conhecimento e boas amizades.

Aos meus pais, o meu muito obrigado por permitirem que todo este percurso fosse possível, tendo sido os meus alicerces nos dias bons e menos bons dos últimos anos. Obrigado ainda pelos valores que me transmitiram, pela paciência nas alturas difíceis e todo o carinho.

À Dianita, por toda a paciência, apoio, carinho e ajuda constante para que esta etapa fosse possível.

A toda a minha família, por sempre terem demonstrado o seu apoio em mim, com as típicas perguntas sobre para quando o término desta etapa.

À minha orientadora, Professora Aurora Futuro e Coorientador, Professor Mário Rui Machado Leite, um agradecimento especial pelo acompanhamento durante os últimos meses.

A todos os professores do DEM, obrigado pela partilha de conhecimento ao longo de todos estes anos, e pela sempre disponibilidade para ajuda.

Aos meus amigos, que partilharam esta aventura comigo, pelas longas noites de estudo, pelas pausas sistemáticas para café, em que tudo se transformava em desculpa para escapar ao estudo, o meu mais sincero obrigado. Sem vocês, a vida académica não seria a mesma.

Um agradecimento final, a todas as restantes pessoas não mencionadas, que cruzaram o meu caminho nos últimos anos, e, indireta ou diretamente, condicionaram este feliz desfecho.

RESUMO

Na fase de desenvolvimento de um projeto mineiro, em particular no desenho do diagrama da instalação de processamento de minérios, diversas simulações são realizadas, com o intuito de antever possíveis problemas e minimizá-los. Existem recursos computacionais que auxiliam estas previsões, no entanto são habitualmente softwares complexos que, para além de onerosos não possuem o objetivo de dimensionar equipamentos. A acrescentar poder-se-á referir que softwares apenas são utilizados em instalações de grande capacidade, não respondendo às necessidades de alguns setores da indústria mineral, como por exemplo o das pedreiras, ou ainda dar resposta a questões tão simples como: a instalação que se encontra montada, suporta ou não um aumento do volume de material processado? Ora, o presente trabalho de dissertação tem como objetivo construir uma plataforma informática que reúna rotinas de seleção e dimensionamento de equipamentos (tipicamente apresentados na forma de tabelas/gráficos) utilizados em instalações de processamento de minérios, nomeadamente: britadores e granuladores, moinhos de bolas e barras, crivos, hidroclassificadores, decantadores e ciclones.

Palavras-chave: Equipamento de processamento de minérios, Dimensionamento de equipamento de processamento de minérios, Processamento de minérios, Plataforma de software

ABSTRACT

In the development of a mining project, in particular, in the design of the flowsheet of the ore processing facility, several simulations are carried out to anticipate possible problems and minimize them. There are computational resources that solve these problems, however, they are usually complex and, in addition to costly ones, do not have the objective of dimensioning equipment. Also, it can be noted that software is only used in large capacity installations, not responding to the needs of some sectors of the mineral industry, such as quarrying, or to answer such simple questions as: in the present installation is it possible or not to increase the volume of material processed? The work aims to construct a computer platform that combines selection and sizing routines for equipment used in mineral processing facilities, namely: crushers and granulators, ball and bar mills, sieves, hydroclassifiers, decaners, and cyclones.

Keywords: Mineral processing equipment's, Mineral processing equipment's dimensioning, Mineral processing, Software platform

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract.....	v
1. INTRODUÇÃO	13
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS E OBJETIVO DO TRABALHO	13
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	13
2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO	15
2.1. FRAGMENTAÇÃO	15
2.2. FRAGMENTADORES PRIMÁRIOS.....	16
2.2.1. FRAGMENTADOR DE MAXILAS	16
2.2.1.1. FRAGMENTADOR TIPO BLAKE E BULLDOG	17
2.2.2. FRAGMENTADOR DE CONES	18
2.3. FRAGMENTADORES SECUNDÁRIOS.....	18
2.3.1. GRANULADOR DE CONES	18
2.3.2. FRAGMENTADOR DE ROLOS.....	19
2.4. MOAGEM.....	19
2.4.1. MOINHO DE TAMBOR.....	20
2.4.1.1. MOINHOS DE BARRAS.....	20
2.4.1.2. MOINHOS DE BOLAS	20
2.4.1.3. MOINHOS AUTOGÊNEOS	21
2.5. CLASSIFICAÇÃO	21
2.5.1. PRINCÍPIOS DA CLASSIFICAÇÃO	22
2.5.2. CRIVAGEM	22
2.5.2.1. GRADES.....	24
2.5.2.2. GRADES CURVAS	24
2.5.2.3. CRIVOS VIBRATÓRIOS.....	24
2.5.2.4. TROMMELS.....	25
2.6. CLASSIFICAÇÃO POR EQUIVALÊNCIA.....	26
2.6.1. HIDROCICLONES.....	26
2.6.2. ESPESSADORES E CLARIFICADORES	28
3. DIMENSIONAMENTO	30
3.1. FRAGMENTADOR DE MAXILAS.....	30

3.2. FRAGMENTADOR DE CONES	31
3.3. MOINHOS	33
3.4. CRIVOS	39
3.5. HIDROCICLONES	43
3.6. DECANTADORES	46
4. DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA	51
4.1. INTRODUÇÃO	51
4.2. INTRODUÇÃO DO DIMENSIONAMENTO NA PLATAFORMA	51
4.2.1. FRAGMENTADORES DE MAXILAS.....	52
4.2.2. FRAGMENTADORES DE CONES	55
4.2.3. MOINHOS	57
4.2.4. CRIVOS	59
4.2.5. DECANTADOR TANQUE	61
4.2.6. HIDROCICLONES	62
5. EXPLORAÇÃO DA PLATAFORMA	65
5.1. FRAGMENTADORES	65
5.2. MOINHOS	68
5.3. CRIVOS	70
5.4. HIDROCICLONES	71
5.5. DECANTADORES	73
6. CONCLUSÃO	74
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
6.2. PERSPETIVAS FUTURAS	75
<i>Referências bibliográficas</i>	<i>77</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tipos de fragmentador de maxilas: Blake, Dodge e Universal (Will's, 2006).....	17
Figura 2.2 – Diferença da câmara de fragmentação entre granulador (1) e fragmentador (2) de cones	19
Figura 2.3 – Representação de uma crivagem.....	23
Figura 2.4 – Esquema hidrociclone (Gupta & Yan, 2006).....	28
Figura 3.1 – Características dos fragmentadores maxilas (Blake) e de cones (Testut, 1958).....	32
Figura 4.1 – Ambiente gráfico da plataforma	52
Figura 4.2 – Interface dos Fragmentadores de Maxilas	52
Figura 4.3 – Interface questão da capacidade.....	54
Figura 4.4 – Fluxograma da plataforma (Fragmentador de maxilas).....	55
Figura 4.5 – Entradas da plataforma (Moinhos).....	57
Figura 4.6 – Fluxograma da plataforma (Moinhos)	58
Figura 4.7 – Entradas da plataforma (Crivos).....	59
Figura 4.8 – Seleção do tipo de crivo (Crivos).....	59
Figura 4.9 – Resultado (Crivos)	60
Figura 4.10 – Fluxograma da plataforma (Crivos).....	60
Figura 4.11 – Interface dos Decantadores	61
Figura 4.12 – Fluxograma da plataforma (Decantadores).....	61
Figura 4.13 – Interface (Hidrociclone).....	62
Figura 4.14 – Interface balanço de massas e fatores (Hidrociclones)	62
Figura 4.15 – Interface dos resultados (Hidrociclones)	64
Figura 4.16 – Fluxograma da plataforma (Hidrociclones)	64
Figura 5.1 – Parâmetros de entrada (Fragmentadores de Maxilas).....	65
Figura 5.2 – Resultados obtidos (Fragmentadores de Maxilas)	66
Figura 5.3 – Introdução de uma nova capacidade (Fragmentadores de Maxilas)	66
Figura 5.4 – Resultados obtidos depois da mudança de capacidade (Fragmentadores de Maxilas)	66
Figura 5.5 – Modelo de fragmentador aconselhado (Fragmentadores de Maxilas)	67
Figura 5.6 – Modelo de fragmentador aconselhado (Fragmentadores de Cones).....	67
Figura 5.7 – Parâmetros de entrada (Moinho de Bolas).....	68
Figura 5.8 – Resultados obtidos (Moinho de Bolas)	68
Figura 5.9 – Resultados obtidos (Moinho de barras)	69
Figura 5.10 – Parâmetros de entrada (Crivos).....	70
Figura 5.11 – Resultados obtidos (Crivos).....	70
Figura 5.12 – Parâmetros de entrada (Hidrociclones).....	71
Figura 5.13 – Balanço de massas e fatores (Hidrociclones).....	71
Figura 5.14 – Resultados obtidos (Hidrociclones)	72
Figura 5.15 – Parâmetros de entrada (Decantadores).....	73
Figura 5.16 – Resultados obtidos (Decantadores).....	73

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Grupos de fragmentação (Leite, 1986)	16
Tabela 2.2 – Abertura admissível para os vários tipos de superfícies.....	23
Tabela 3.1– Potência de moinhos de bolas tipo overflow (Rowland).....	33
Tabela 3.2 – Potência de moinhos de barras tipo overflow (Rowland).....	34
Tabela 3.3 – Fator de ineficiência em circuito aberto (Rowland)	35
Tabela 3.4 – Fator de eficiência do diâmetro do moinho (Rowland)	36
Tabela 3.5 – Fator EF8 para diferentes tipo de alimentação	38
Tabela 3.6 – Relação do D50c com a granulometria desejada (Arterburn, 1882)	43
Tabela 5.1 – Dados de entrada na plataforma (Hidrociclones)	71
Tabela 5.2 – Resultados obtidos através do dimensionamento teórico (Hidrociclones)	72
Tabela 5.3 – Dados de entrada na plataforma (Decantadores)	73

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 – Gráfico do fator A para granulometrias menores que 25 mm (Metso, 2014).....	41
Gráfico 3.2 – Gráfico do fator A para granulometrias maiores que 25 mm (Metso, 2014)	41
Gráfico 3.3 – Gráfico do fator B (Metso, 2014).....	42
Gráfico 3.4 – Gráfico do fator C (Metso, 2014).....	42
Gráfico 3.5 – Relação entre pressão e capacidade (Arterburn, 1882)	45
Gráfico 3.6 – Relação entre a capacidade do apex e a sua dimensão (Arterburn, 1882).....	45
Gráfico 4.1 – Capacidade de um fragmentador de maxilas.....	53
Gráfico 4.2 – Capacidade de um fragmentador de cones	56
Gráfico 4.3 – Potência de um fragmentador de cones	56

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS E OBJETIVO DO TRABALHO

A indústria extrativa assume um papel fundamental na manutenção e no desenvolvimento da sociedade que atualmente conhecemos. Desde sempre, a exploração de matéria primas teve um forte impacto na humanidade, assumindo espaços temporais como a idade do ferro, e do cobre. Esta extração e processamento de matérias primas foi sofrendo uma atualização, promovendo o melhor aproveitamento da espécie mineral a extrair.

O processamento de minérios apresenta-se como uma das etapas de maior relevância durante este processo, pois é nesta etapa que surge uma maior beneficiação da espécie mineral. Esta etapa apesar de ter um elevado grau de desenvolvimento, necessita de uma atualização constante garantindo a melhor otimização e um melhor aproveitamento da matéria prima. Uma melhor otimização deve-se, em grande parte, ao correto dimensionamento dos equipamentos de processamento de minérios, garantindo uma melhor eficiência em todo este processo.

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma plataforma informática para o dimensionamento de equipamento de processamento de minérios. Esta ferramenta permite dotar o utilizador de uma plataforma prática e intuitiva, garantindo a obtenção de informações úteis de apoio à decisão.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em seis capítulos, onde demonstra todas as etapas realizadas na construção da plataforma informática:

- O presente capítulo consiste numa breve introdução do trabalho desenvolvido;
- O segundo capítulo consiste numa introdução teórica, onde estão evidenciados aspetos relevantes dos equipamentos que, nos capítulos seguintes, são utilizados no desenvolvimento da plataforma;
- No terceiro capítulo é abordado o dimensionamento teórico dos equipamentos;
- O quarto capítulo consiste no desenvolvimento da plataforma, discriminando todos os passos seguidos para realizar a construção da mesma;

- A discussão e os resultados estão presentes no quinto capítulo, onde são demonstrados os vários dimensionamentos realizados através da plataforma;
- Por último, no capítulo seis, são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido, assim como as perspectivas futuras.

2

ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1. FRAGMENTAÇÃO

A fragmentação é uma operação fundamental para o beneficiamento de minérios, promovendo a progressiva redução da granulometria. Esta redução permite obter a granulometria mais apropriada para as seguintes fases do seu processamento. As fases seguintes podem consistir numa preparação da espécie mineral para a introdução no mercado ou garantir a correta libertação e consequente separação necessária para valorização dos seus constituintes.

Esta etapa é a que representa um maior custo associado, sendo que o grau de libertação da espécie mineral interfere diretamente com a curva de recuperação da mesma. Os objetivos fundamentais desta operação passam pela promoção da libertação das espécies minerais, garantir a produção de calibres apropriados para as seguintes etapas do processamento de minérios e produzir partículas para utilização imediata.

O primeiro objetivo consiste na obtenção de calibres centrados na granulometria pretendida, com o intuito de obter o mínimo de finos e o mínimo de grãos. Este objetivo garante menores perdas por incapacidade de recuperação por parte dos equipamentos de processamento ou fraca libertação da espécie minerais, o que conduz a uma maior perda por falta de libertação.

O segundo objetivo permite contornar as diversas condicionantes como o transporte, quando estão presentes instalações de grande capacidade que envolvem o transporte da espécie mineral para outras fases do processamento, e a adequação da granulometria a um determinado equipamento de processamento.

O terceiro objetivo consiste na fragmentação e na classificação por lotes de um minério de utilização imediata, em que estes processos garantem a sua valorização.

Com o intuito de facilitar a interpretação das diferentes fases de fragmentação, e de acordo com as características dos processos de fragmentação, podem dividir-se em três fases:

- Britagem (fragmentação primária);
- Granulação (fragmentação secundária);
- Moagem (fragmentação terciária);

Esta divisão é acompanhada essencialmente pelo tipo de granulometria a obter. Inicialmente teremos blocos de grande dimensão que passam pela operação de britagem, produzindo britas. De seguida

durante a etapa de granulação, as britas são reduzidas a gravilhas, que posteriormente, através da etapa de moagem, são reduzidas a areias finas e lamas. A ordem cronológica de redução de calibre sucessivo permite obter uma associação entre as diferentes classes da fragmentação e as respectivas classes dimensionais.

Tabela 2.1 – Grupos de fragmentação (Leite, 1986)

Designação	Granulometria (mm)
Grandes blocos	1000 / 250
Blocos	250 / 70
Britagem	
Britas graúdas	70 / 40
Britas miúdas	40 / 20
Granulação	
Gravilhas graúdas	20 / 10
Gravilhas miúdas	10 / 5
Moagem	
Areias grossas	20 / 10
Areias finas	10 / 5
Lamas	- 0,2

2.2. FRAGMENTADORES PRIMÁRIOS

Os fragmentadores primários são os equipamentos utilizados na linha da frente quando se necessita de uma redução de granulometria para possibilitar o seu transporte para outras etapas de beneficiamento. Estes equipamentos de elevada robustez, operam normalmente em circuito aberto e podem ser divididos em três grandes grupos: os fragmentadores de maxilas, de cones e de impacto. Os fragmentadores de impacto possuem um uso limitado, necessitando de condições de operação específicas.

2.2.1. FRAGMENTADOR DE MAXILAS

Os fragmentadores de maxilas são geralmente classificados atendendo ao movimento e ao ponto de fixação da maxila oscilante, sendo que o fragmentador em uso atualmente é o *Blake* (Will's, 2006). Neste tipo de fragmentador, a maxila móvel é fixa na parte superior, impondo um limite de granulometria de material na alimentação, sendo, contudo, a descarga variável.

Relativamente à constituição deste tipo de equipamento, é dotado de duas maxilas que abrem e fecham de maneira cíclica. Estas mesmas maxilas estão posicionadas num determinado ângulo relativo entre as duas, sendo que uma delas realiza o movimento de abertura e fecho, enquanto a outra permanece fixa. Uma vez introduzido o material no equipamento, este é fragmentado partícula a partícula, isto é, as mesmas não interagem entre si, mas com os constituintes do equipamento de fragmentação. Depois de fragmentado, o material acaba por fazer o percurso ao longo da câmara de fragmentação, onde é descarregado.

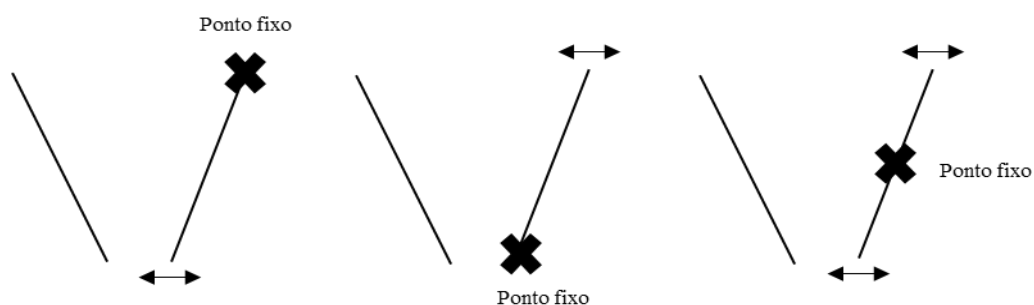


Figura 2.1 – Tipos de fragmentador de maxilas: Blake, Dodge e Universal (Will's, 2006).

2.2.1.1. FRAGMENTADOR TIPO BLAKE E BULLDOG

O fragmentador tipo *Blake* é considerado o mais utilizado atualmente, tendo sofrido atualizações e melhorias ao longo do tempo, mas mantendo a sua configuração inicial. Este tipo de britador pode ser dividido em duas formas: britador de dois pratos e britador de um prato.

A mecânica do fragmentador do tipo *Blake* de dois pratos passa pelo acionamento de um motor, que promove a rotação de uma cambota, imprimindo, posteriormente, um movimento ascendente e descendente da biela, e causando consequentemente uma variação do ângulo entre os dois pratos. Quando a biela ascende, os extremos dos pratos afastam-se, sendo que um prato encosta ao dispositivo de fixação e o outro obriga a maxila móvel a aproximar-se da fixa. Quando a biela desce, o ângulo entre os pratos diminui, promovendo o afastamento das maxilas.

Os fragmentadores graúdos foram desenhados para um funcionamento cuja interação entre partículas se pode dizer bastante reduzida, tendo em conta o tamanho das mesmas. Este fenómeno acontece, pois, dentro da mesma câmara de fragmentação, partículas menores conseguem alcançar muito maior número relativamente a partículas de maior volume. Assim, poderá ser feita a assunção de que as interações existentes serão entre a partícula e as peças fragmentadores de grande massa. Desta forma, estas mesmas peças transmitem a sua energia para o elemento, até este atingir a sua fracturação.

Por conseguinte, é importante referir algumas componentes que irão determinar o transporte interno e consequentemente o tempo de residência, nomeadamente a força gravítica, bem como a geometria da câmara de fragmentação e o movimento relativo das peças de fragmentação.

Relativamente ao tempo de residência, é considerado uma variável independente do caudal de alimentação, o que implica que qualquer alteração ao nível da regulação irá ter repercussões no movimento do corpo dependentes unicamente das dimensões do equipamento.

Com o desenvolvimento e constante atualização do fragmentador tipo *Blake*, surgiu uma variante do mesmo, que usa só um prato, denominando-se fragmentador de maxilas do tipo *Bulldog*. Esta remoção de um prato levou a uma diminuição do corpo do fragmentador e consequentemente de peso, tornando este tipo de equipamento mais económico.

A principal característica desta variante prende-se com o facto de que a maxila apresenta uma componente de arrasto, garantindo uma melhor descarga dos produtos que se encontram na câmara de fragmentação. Este movimento descrito deve-se à conjugação do movimento contra a maxila fixa e do movimento vertical quando a biela roda. Com a mesma regulação, este equipamento apresenta uma

maior capacidade face ao fragmentador de dois pratos, contudo leva a um maior desgaste das forras internas devido à função de arrasto, o que se torna uma desvantagem.

2.2.2. FRAGMENTADOR DE CONES

Os fragmentadores de cones são maioritariamente utilizados em instalações exteriores, contudo, alguns podem ter um plano de atuação subterrânea. Em ambos os casos, o seu funcionamento consiste num eixo com uma cabeça, constituída por um elemento de mordedura cónico de aço duro, com encaixe numa manga excêntrica. Este tipo de granulador surge numa evolução do fragmentador de maxilas, no sentido de promover uma maior capacidade volumétrica da sua câmara de fragmentação, com uma configuração semelhante. Desta forma, a alteração iminente consiste na transformação das maxilas planas existentes de limites bem definidos lateralmente, no fragmentador de maxilas, em componentes contínuos, no fragmentador de cones. Assim, a maxila fixa dá lugar a uma estrutura tronco-cónica, enquanto que a maxila móvel é substituída por uma cónica, de encaixe na primeira, com um movimento circular, análogo a um pêndulo.

O seu funcionamento ocorre pela rotação do eixo, que cria um caminho cónico ao longo da câmara de fragmentação fixa, onde o movimento máximo é atingido junto à descarga. A fragmentação das partículas ocorre de forma contínua, sem acarretar uma diminuição do volume disponível para o material a fragmentar, pois a câmara de fragmentação é dividida em setores de fecho e setores de abertura, constituindo assim a principal vantagem relativamente aos fragmentadores de maxilas.

Devido a estas características, a alimentação deste equipamento pode ser total sem acarretar possíveis encravamentos, possibilitado um elevado coeficiente de aproveitamento da capacidade nominal disponível.

2.3. FRAGMENTADORES SECUNDÁRIOS

Os fragmentadores secundários consistem num equipamento de peso e estrutura reduzida em relação aos fragmentadores primários. Como a sua alimentação provém inicialmente de um fragmentador primário, trabalha com partículas de calibres inferiores e livres de constituintes passíveis de o danificar, como peças metálicas provenientes do desmonte.

Este equipamento tolera uma alimentação seca, possibilitando a preparação das partículas para a seguinte etapa na preparação de minérios, a moagem. No caso dos minérios metálicos, a fragmentação secundária constitui a etapa onde ocorre a maior parte da fragmentação do material.

2.3.1. GRANULADOR DE CONES

Um granulador de cones consiste numa versão modificada do fragmentador de cones. Esta diferença reside no facto de que o cone de fragmentação não está suspenso, mas sim suportado num rolamento, localizado na parte inferior da peça fragmentadora.

Com o acionamento de um motor irá ser transmitida a energia através de um pinhão até ao veio principal. O veio principal é dotado de uma cremalheira que, com a sua rotação, imprime um movimento excêntrico na peça fragmentadora.

O granulador de cones mais utilizado é o granulador tipo *Symons*. Estes equipamentos apresentam uma câmara de fragmentação em forma de V, com ângulos pequenos, possibilitando a fragmentação de

calibres mais reduzidos. Pode ser produzido de duas maneiras: a maneira *Standard*, para utilização normal numa fragmentação secundária, e a *Short-Head* para realização de um trabalho mais fino. A principal diferença destes dois tipos consiste no perfil do cone.

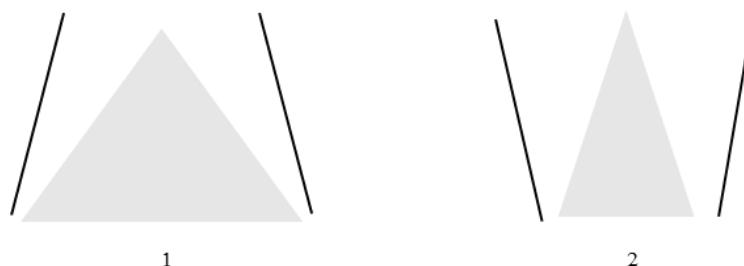


Figura 2.2 – Diferença da câmara de fragmentação entre granulador (1) e fragmentador (2) de cones

Mecanicamente apresentam um sistema de suspensão recorre a um conjunto de molas que possibilitam a suspensão do cone. A sua afinação é realizada através da rotação da peça portadora da saia. Podemos ainda encontrar diversos modelos de câmaras de fragmentação, sendo necessário considerar o tipo de granulação a realizar.

2.3.2. FRAGMENTADOR DE ROLOS

Os trituradores abordados neste tópico caracterizam-se pela presença de dois rolos constituintes, com um movimento de rotação em torno do seu próprio eixo e inverso em relação ao contrário. A distância entre os dois rolos corresponde ao tamanho maior que as partículas que são descarregadas podem atingir após a fracturação.

Atualmente, o seu uso tem vindo a diminuir devido ao aparecimento de equipamentos com a mesma função, mas com uma capacidade muito mais competitiva, nomeadamente dos granuladores de cones, anteriormente referidos. Contudo, em etapas finais, continuam a ser utilizados.

Pode ser feita uma classificação destes fragmentadores de acordo com diferentes parâmetros, nomeadamente:

- Características da superfície dos rolos;
- Atributos do movimento dos rolos entre si;

Este tipo de fragmentadores podem ser divididos em grupos tendo em conta o sistema de apoio dos rolos.

2.4. MOAGEM

A operação de moagem é considerada o processo final da redução de calibres, contemplando, portanto, a etapa terminal de todos os processos de fragmentação. Esta operação acarreta elevados custos pois, além de proporcionar elevadas relações de redução, existem custos elevados relativos à energia e ao consumo de aço utilizados pelo equipamento. A escolha destes equipamentos e a sua utilização num determinado circuito deverá ser uma escolha ponderada, garantindo uma diminuição dos custos e maximizando o seu rendimento por parte da sua utilização. Contudo e por outro lado, este processo

também se releva uma vantagem na área de exploração mineira, uma vez que a moagem faz um controle apertado do tamanho do produto, revelando se a sua extração será vantajosa, de acordo com a concentração do mesmo, face ao rejeitado.

Com uma simples análise, uma sub-moagem acarreta produtos grosseiros e consequentemente mau investimento económico. Pelo contrário, uma sobre-moagem desnecessária diminui o tamanho das partículas, quer de ganga, quer da substância útil a ser extraído, até níveis inferiores aos recomendados para a máxima eficiência. Conclui-se que o principal objetivo da moagem será a obtenção do grau de libertação correto.

Contudo, a moagem apresenta ainda uma série de outras funções, de entre as quais se destaca a capacidade de separação do mineral em questão do restante minério, bem como a obtenção de volumes passíveis de serem diretamente usados.

A sua ação ocorre devido a uma constituição complexa, conjugando impacto e abrasão para a obtenção do produto final pretendido. Este processo ocorre pelo movimento relativo de câmaras cilíndricas de aço, as quais contêm o minério em questão, em relação ao moinho, variando entre dois subtipos de moinho – de queda e de tambor (vide infra).

Este processo pode ocorrer por via seca ou húmida. Em ambos, quando a carga começa a movimentar-se, a maior parte da energia cinética perde-se sob a forma de calor, ruído, entre outros, sendo que apenas uma pequena parte da mesma atua na fragmentação dos corpos.

2.4.1. MOINHO DE TAMBOR

O moinho de tambor é considerado o único equipamento utilizado nas estações de tratamento de minérios, para realização de moagem fina. Este equipamento de fragmentação assume a forma de um cilindro horizontal dotado de rotação sobre o seu eixo, com forros interiores capazes de suportar o desgaste causado pela ação do moinho. A cominuição aqui ocorrida caracteriza-se por uma elevada interação entre as diferentes partículas, correspondendo a uma cominuição coletiva.

Este tipo de equipamento pode ser dividido em três tipos: moinhos de barras, bolas e autogéneo. Esta diferenciação deve-se ao tipo de agente moente que vai atuar no interior do moinho. Nos moinhos de barras são utilizadas barras de ferro, já nos moinhos de bolas, bolas de ferro e, por último, nos moinhos autogéneos é utilizado o próprio material como agente moente.

2.4.1.1. MOINHOS DE BARRAS

Este subtipo de moinho de tambor pode ser colocado na classe de moagem fina ou grosseira, sendo maioritariamente usados como moinhos de granulometria fina quando se trata de minérios argilosos ou pobres em mineral.

O comprimento da sua câmara cilíndrica tem uma proporção direta de 1,5 a 2,5 vezes superior ao seu diâmetro, o que previne que as barras constituintes se invertam dentro do moinho.

2.4.1.2. MOINHOS DE BOLAS

Estes equipamentos revelam-se mais eficazes na moagem fina, em comparação com os moinhos de barras, uma vez que as bolas apresentam uma maior área de superfície.

A razão comprimento-diâmetro está estabelecida de 1,5 para 1, sendo que valores superiores, entre 3 e 5, levam a mudar a classificação de moinhos de bolas para moinhos de barras.

O seu funcionamento pode ocorrer através de circuitos abertos ou fechados. No primeiro, o produto final contempla uma vasta gama no que respeita ao tamanho das partículas, desde finas a grosseiras. Por outro lado, no circuito fechado, o tempo de residência é adequado, o que ultrapassa o problema referido anteriormente, levando-o a uma maior utilização em fases terminais.

A eficiência destes moinhos é importante para uma razão custo-benefício aceitável, existindo, portanto, alguns fatores que deverão ser tidos em conta para essa mesma finalidade. Por exemplo, a densidade da polpa deverá ser alta, uma vez que quando baixa, o contacto metal com metal aumenta a sua degradação, pelo que as bolas deverão ter uma camada de minério protetora em torno de si próprias.

Para a otimização deste equipamento, as bolas devem mover-se à velocidade máxima possível, sem que ocorra movimento centrífugo.

2.4.1.3. MOINHOS AUTOGÉNEOS

Este tipo de moinho de tambor é o mais recentemente desenvolvido na indústria mineira e tem-se revelado uma das grandes introduções na área, apesar do aparecimento de cada vez mais possíveis substitutos no futuro. A grande diferença consiste no facto de que o minério, desde que constituído por fragmentos capazes, atua como agente moente. Existe ainda uma variante deste tipo de equipamento que consiste no semi-autogénio, onde ocorre a introdução das bolas de aço.

As suas vantagens prendem-se com o custo baixo, a vasta gama de minerais capazes de tratar e o mais importante do ponto de vista prático, a facilidade de manuseamento pelo profissional.

2.5. CLASSIFICAÇÃO

Todas as operações envolvidas na preparação de minérios são fundamentais, sendo que, no caso da classificação, a mesma ocupa um lugar de destaque. Este processo permite a realização de uma divisão de um lote inicial composto por várias granulometrias, em vários lotes com granulometrias aproximadas, separados de acordo com a velocidade a que caem através de um fluído. Esta operação pode ser encontrada um pouco por toda a instalação de preparação de minérios, pois não apresenta uma localização definida, contudo estas operações estão normalmente localizadas anteriormente às operações de concentração.

É importante ainda referir os pontos a ter em conta quando se trata deste tipo de técnicas. Em primeiro lugar, a granulometria das partículas, visto que esta será uma das variáveis que irá permitir separar os diferentes minérios, assim como a própria forma da partícula. Por outro lado, também a densidade relativa será relevante nesta análise, relacionando-se diretamente com o parâmetro massa referido anteriormente.

O processo poderá ser dividido em vários tipos de classificações, consoante a sua localização:

- Classificação à cabeça;
- Classificação de controlo;
- Classificação de seleção;

A classificação à cabeça geralmente é realizada com o intuito de retirar os finos antes da operação de fragmentação. A classificação de controlo é geralmente utilizada para realizar o fecho do circuito, garantindo que a descarga do fragmentador apresenta uma granulometria constante. A classificação de seleção é realizada para obter diferentes lotes com diferentes granulometrias, dependendo da utilização final do produto.

Este simples processo permite aumentar a eficiência dos equipamentos de preparação de minérios, garante classificações com um grau de seletividade maior e permite a realização de operações de controlo, possibilitando a análise a todo o processo.

2.5.1. PRINCÍPIOS DA CLASSIFICAÇÃO

Para explicar todo este processo poderá fazer-se a comparação entre o vácuo e o ar/água, em que a principal grande diferença entre os dois será a resistência.

No primeiro, quando duas partículas são largadas, a sua velocidade tende a aumentar a uma aceleração constante, independentemente da sua massa ou densidade. Contudo, quando é adicionada a variável resistência, este fenómeno deixa de ser observado, sendo que há agora uma força contrária ao movimento do corpo. Diz-se que o corpo atinge a velocidade terminal quando as forças gravíticas e a resistência do fluido se equilibram, condicionando a partir desse momento a uma velocidade constante.

Relativamente a esta resistência provocada pelo fluído convém salientar dois extremos:

Quando o corpo se move a uma velocidade baixa, acaba por conseguir produzir um movimento conjunto do fluído que se encontra em torno de si próprio, sendo que aquele mais distante permanece inalterado. Entre a camada em deslocamento e o fluído imóvel, existe uma zona de fluído onde as forças de tensão são bastante elevadas.

Por outro lado, a velocidades elevadas, o grande contributo para a elevada resistência permanece no movimento de grandes quantidades de fluido, e não unicamente numa fina camada, o que faz com que a viscosidade do fluído se torne pequena, por comparação. Foi com recurso ao conceito de resistência que os classificadores surgiram.

Estes têm por base uma coluna de triagem, em que se encontra um fluido em movimento constante, e onde se colocam as misturas que queremos triar. Desta forma, as diferentes granulometrias e formas são separadas de acordo com a sua capacidade de ascender ou descender dentro da coluna. Esta variação vai depender da sua velocidade terminal (*vide supra*), conforme seja menor ou maior, respetivamente, relativamente à velocidade do fluido.

2.5.2. CRIVAGEM

Para determinação do calibre de uma amostra poderão ser utilizados métodos de determinação direta, por critérios geométricos, ou indireta, em que se mede uma medida função do calibre – velocidade de sedimentação. Nos métodos diretos utiliza-se então em primeira instância a calibragem / crivagem.

Esta operação consiste em garantir que todas as partículas da alimentação irão entrar em contacto com a superfície de crivagem, e auferindo através da sua passagem pelas aberturas existentes no crivo, a qual pode ou não ocorrer. O crivo consiste na superfície de crivagem e é composto por uma malha com várias aberturas na sua superfície. Estas aberturas designam-se por calibre de corte. Se o produto em questão passar este crivo, passa a infracrivo, caso contrário, a sua manutenção superiormente denomina-se de sobrecrivo.

Existem alguns conceitos importantes a referir, tais como calibre limite, que consiste no limite superior de cada lote que foi atravessado pelas suas partículas constituintes, num crivo com várias superfícies de crivagem, e calibre de retenção, que seguindo a mesma linha de raciocínio consiste no limite inferior desse mesmo lote. Diz-se que estamos perante uma crivagem cerrada, no caso do intervalo de valores entre o calibre limite e o calibre de retenção ser muito curto.

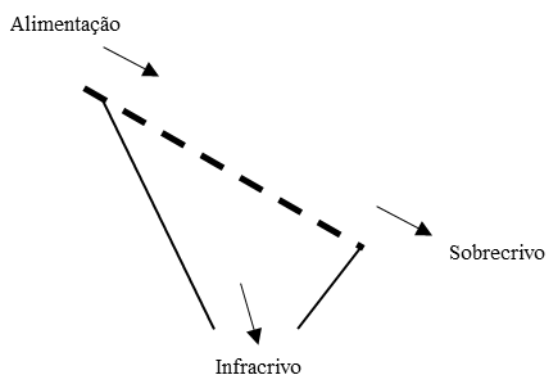


Figura 2.3 – Representação de uma crivagem

As superfícies de crivagem podem assumir diversos padrões dependendo do calibre do material. Frequentemente são utilizados padrões quadrados, contudo, em presença de calibres mais grosseiros são utilizadas grades ou chapas metálicas perfuradas.

Pode fazer-se uma escala crescente no que respeita à homogeneidade do produto, relativamente às secções: retangular > quadrada > circular.

De acordo com estas variações, aquando da escolha das superfícies de crivagem, existem alguns parâmetros que devem ser considerados, tais como, a segurança da marcha, regularidade da abertura, área útil de crivagem, aptidão à colmatagem em trabalhos húmidos à obstrução por calibres de isocrivo, resumidos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Abertura admissível para os vários tipos de superfícies

Abertura admissível (mm)	Tipo de superfície
40 a 300	Grelhas ordinárias
0,3 a 150	Chapas perfuradas
0,1 a 125	Malhas metálicas
0,04 a 0,1	Malhas em nylon
0,3 a 3	Grelhas de fendas transversais

2.5.2.1. GRADES

Este tipo de crivo tem na sua constituição barras de aço retangulares/trapezoides seccionalmente, cuja orientação é paralela ao sentido da inclinação. São, na sua maioria, utilizadas para uma crivagem de granulometria mais grosseira, para realização de classificação à cabeça.

Quando se trata de instalações cuja capacidade é restrita, o risco de encravamento é considerável, pelo que se tenta assegurar que tal fenómeno não acontece através de grades horizontais que cobrem as torvas de descarga. No entanto, o risco de encravamento entre os espaços das grades não se apresenta desprezível e no sentido de o diminuir e assegurar um melhor funcionamento foram sido desenvolvidos novos equipamentos que aliam às grades uma estrutura em movimento – ex. grelhas de rolos; grelhas *Grizzly*. Nestas situações, pode ser colocada uma segunda superfície de crivagem, cujo objetivo final será a extração de finos.

2.5.2.2. GRADES CURVAS

Neste tipo de superfície de crivagem, ocorre uma separação sólido-líquido, tal como na crivagem geral, com o intuito de secar o produto sólido. Poderá ainda ser utilizado para conseguir fazer cortes de forma precisa, em calibres finos entre 0,15 e 0,5 mm.

A sua constituição é conseguida através de uma caixa de metal, onde circula a polpa de interesse, e onde esta mesma entrará em contacto, perpendicularmente, com as barras trapezoidais que irão iniciar o processo de crivagem.

À medida que a polpa é colocada, o seu movimento provoca uma centrifugação da parte líquida, que acaba por sair através de fendas nas paredes, formadas pelas barras. Com a diminuição do líquido, a polpa vai-se tornando progressivamente sólida e sedimenta.

Estas grelhas são maioritariamente utilizadas em crivagens de recuperação do médium em meios densos, para fechar circuitos de moagem em moinhos de barras previamente a tratamentos hidrográuticos de metais não sulfuretos e para uma primeira fase de secagem de polpas.

2.5.2.3. CRIVOS VIBRATÓRIOS

Os crivos vibratórios têm vindo a ocupar um lugar de cada vez mais destaque na indústria de extração moderna. O seu funcionamento rege-se por um movimento vibratório, que poderá ser conseguido de forma elétrica ou mecânica, em que os seus componentes metálicos dotados de alta resistência em termos mecânicos, constituintes das superfícies de tamizagem planas, sofrem a atuação de uma vibração a frequências na ordem dos 1000 a 3000 ciclos por minuto (Leite, 1986).

De entre os cuidados a ter no que refere à segurança deste equipamento, destaque para a robustez dos chassis, de forma a suportar toda a vibração inerente, permitindo ainda um bom suporte do tecido de crivagem, importantes para garantir as condições ótimas de funcionamento do equipamento, tal como destaque para o fabrico de maciços de apoio e sustentações sólidas, contendo camadas de borracha, no sentido de minimizar ao máximo as vibrações que poderão ser transmitidas ao edifício.

No que respeita aos diferentes tipos de crivos, pode ser feita uma distinção em termos de inclinação e direção da vibração dos mesmos em 3 grupos: A, B e C. Os primeiros apresentam uma inclinação acentuada, associada a uma vibração retilínea em relação à superfície de crivagem. No que concerne ao grupo B, a sua inclinação será intermédia, com vibração circular. Por último, os constituintes do grupo C, apresentam uma vibração horizontal e dirigida. Estas diferentes relações entre vibração e inclinação

devem-se à regra de que “quanto menor a intensidade da componente tangencial relativamente à normal, maior terá de ser a inclinação para aumentar a participação da ação gravítica”.

Grupo A

Em termos industriais, estes são os designados crivos elétricos, cujo funcionamento se baseia em eletromagnetismo, conseguido através de uma superfície de crivagem assente sobre um caixilho rígido, o qual apresenta um ponto central vibratório. Tendo em conta a pequena amplitude e alta frequência da vibração, a superfície necessita obrigatoriamente de uma inclinação acentuada, face à direção retilínea referida.

Grupo B

Este tipo de crivos apresentam uma grande versatilidade em termos de aplicabilidade e manuseamento, devido à sua simples conceção. A inclinação associada à força gravítica e ao movimento circular, permitem um movimento facilitado do material, acelerando-o na entrada da alimentação, e retardando o seu movimento na zona de descarga.

Quando se opta por um equipamento desta gama de vários andares, a instalação é simplificada, contudo a sua eficiência decai, o que leva a que, para instalações de grande calibre, uma capacidade superior a 2 telas por crivo e uma relação entre malhas superior a 1/3 sejam desaconselhadas.

Grupo C

Neste caso, a trajetória do chassis pode ser representada de forma circular, de um arco, com diâmetro considerável e a sua montagem ocorre na horizontal, o que provoca que, o material de descarga assente horizontalmente vibre de acordo com uma trajetória circular, com um movimento oscilante verticalmente. Este tipo de movimento pode, entre outras formas, ser alcançado através da montagem de um vibrador eletromagnético num plano inclinado.

Comparativamente aos restantes, estes crivos são de custos mais elevados e menor eficiência, pelo que o seu uso é restrito. Os locais onde se poderá observar mais a sua montagem têm em comum características como, por exemplo, a baixa altura do local de montagem.

2.5.2.4. TROMMELS

No que respeita a este equipamento de crivagem pode-se referir que possui um movimento central lento rotativo, com inclinação na ordem dos 10 a 20 graus, de superfícies de crivagem de forma cilíndrica. Para uma separação mais grosseira, estas mesmas superfícies costumam ser sob a forma de chapas perfuradas, enquanto que para a obtenção de finos, a escolha recai em redes metálicas.

À medida que os cortes vão sendo realizados, os calibres do produto vão aumentando, sendo o primeiro lote de maior calibre e mais grosseiro, e o último de menor, logo mais fino. Consequentemente, consegue-se auferir que os primeiros lotes, de granulometria elevada, possuem normalmente contaminação de finos, e que, por outro lado, as redes metálicas para separação dos finos acabam por sofrer um desgaste considerável, pela passagem prévia das partículas mais graúdas.

Por estas desvantagens e pela baixa eficiência associada à pequena capacidade, este tipo de equipamento tem vindo a entrar em desuso, substituído por máquinas mais apelativas, sendo que atualmente poderá

ser encontrado apenas em instalações mais pequenas, areeiros ou ainda em instalações móveis para produção de britas, associadas a redes de estradas.

2.6. CLASSIFICAÇÃO POR EQUIVALÊNCIA

Dentro das possíveis técnicas de classificação utilizadas, a sedimentação gravítica ocupa um lugar de destaque, devido ao seu uso comum adquirido por uma série de vantagens face a outros métodos, tais como o custo reduzido e elevada capacidade do processo utilizado.

Através do fenómeno de sedimentação, obtém-se um fluido superiormente às partículas, límpido, de concentração reduzida, sendo que o intuito será aos poucos aumentar a concentração da suspensão.

Os espessadores utilizados para a realização deste processo podem operar de forma contínua ou através de lotes, consistindo em tanques onde ocorre o processo de separação entre líquido e sólido. É importante referir que existem alguns equipamentos que operam de forma semelhante, cuja única diferença reside na concentração do produto a tratar, bastante menor – a este dá-se o nome de clarificadores.

Relativamente aos espessadores contínuos, a sua câmara é cilíndrica, e são alimentados proximamente à superfície, de forma a minimizar a agitação das partículas. Assim, o líquido começa a mover-se perifericamente, sendo posteriormente removido por uma bomba, enquanto que o material de importância sedimenta no centro deste mesmo tanque e é retirado através de um tubo. Esta câmara referida é acoplada a, normalmente, um ou mais braços que giram em sentido radial, para ajudar na promoção da saída dos materiais sólidos por um orifício na parte central. Este fenómeno também funciona como um mecanismo de segurança, em caso de se verificar um excessivo carregamento do tanque.

No sentido de favorecer estes mecanismos, a estrutura destes equipamentos consiste num topo plano associado aos braços rotatórios com uma ligeira inclinação no sentido do orifício central. Consequentemente, os sólidos tendem a armazenar, provocando uma base inclinada.

O diâmetro dos tanques destes equipamentos condiciona o método a utilizar para suportar toda esta estrutura. Desta forma, quando se trata de diâmetros menores, na ordem dos 45 metros ou menos, a cabeça de acionamento é sustentada por uma estrutura de grandes dimensões que abrange o todo o tanque e cujos braços são ancorados pelo eixo de transmissão. Contudo, para diâmetros superiores, que poderão atingir os 180 metros, a principal forma de atuação é através do suporte do mecanismo de acionamento referido numa estrutura de aço, imóvel ou numa coluna central.

2.6.1. HIDROCICLONES

Os hidrociclones fazem parte do grupo de equipamentos com maior uso em termos de classificação, sendo que este facto se deve a inúmeras vantagens face a outros da mesma gama, nomeadamente: um manuseamento de fácil perceção para o operador; elevada capacidade relativamente ao espaço ocupado, bem como volume; serem acessíveis em termos de investimento, apesar de um pouco mais dispendiosos no que respeita aos custos de utilização, devido aos seus consumos energéticos; entre outros. Devido a estas vantagens apresentadas, podem-se considerar estes equipamentos de uso comum.

Contudo, tal como todos os equipamentos, também apresentam algumas desvantagens inerentes. Entre elas, destaque para a incapacidade de minimização de variações ao nível da alimentação, devido ao volume reduzido, e os custos de manutenção podem ser consideráveis para minérios específicos. Em comparação com classificadores, os hidrociclones podem revelar-se uma má escolha devido ao

significativo menor controlo de não-passagem de grossos para o *overflow*, em situações onde se verifiquem oscilações ao nível da carga de alimentação. Este último ponto implica que as instalações munidas desta máquina possuam de um controlo mais apertado.

No que respeita à sua estrutura, normalmente são de chapa, revestidos a borracha, sendo que este revestimento é passível de ser renovado em intervalos de tempo, permitindo um menor gasto em manutenções, assim como permite diminuir o tempo necessário para a sua reparação.

Ao nível do topo da câmara cilíndrica, ocorre a descarga da polpa desejada, sob pressão, que percorre um túnel, posteriormente. Por aceleração centrífuga, a polpa descarregada entra em movimento de rotação, sendo que as partículas menores se aglomeram no centro – local de saída do hidrociclone, por um orifício superior - e as maiores sofrem uma projeção periférica, seguida de um movimento descendente – saindo por um orifício inferior. Em casos hipotéticos que o hidrociclone apresentasse uma estrutura invertida, o seu funcionamento, explicado anteriormente, ocorreria de igual forma, uma vez que a aceleração centrífuga é muito maior que a aceleração gravítica.

Assim, o único caso em que a posição apresenta relevância é relativo a hidrociclones de baixa pressão, mas com diâmetros muito grandes – todos os hidrociclones, independentemente da sua posição devem permitir que as suas duas correntes – *underflow* e *overflow* – efetuem uma descarga a alturas aproximadas, para uma pressão atmosférica constante, de forma a que o desempenho do equipamento não seja comprometido.

Em relação a sua composição, os hidrociclones são dotados de diversos elementos, garantindo a sua operacionalidade. Esses elementos são:

- Diâmetro do hidrociclone;
- Diâmetro do *vortex-finder*;
- Área de abertura da entrada;
- Altura da parte cilíndrica;
- Diâmetro do *apex*.

O diâmetro do ciclone é responsável por definir a sua capacidade e o seu diâmetro de corte, isto é, com um aumento do seu diâmetro, a sua capacidade irá aumentar, assim como o diâmetro de corte. Em relação ao diâmetro do *vortex-finder* pode ser variável mediante a necessidade de regular a capacidade deste equipamento, quando na presença de um hidrociclone de diâmetro fixo. A área de abertura de entrada é responsável pela determinação da velocidade tangencial, constituindo um fator de grande influência no processo de classificação. Cada hidrociclone pode ser produzido com diferentes áreas de abertura, dependendo da necessidade do utilizador. O diâmetro do *apex* não apresenta grande influência na capacidade, contudo determina a capacidade de descarga e a percentagem de sólidos existente no *underflow*.

Quando operado, o hidrociclone pode apresentar três tipos de descarga: descarga em cordão, descarga em cone e descarga em *spray*. Estes tipos de descargas permitem ao utilizador verificar se o equipamento se encontra a operar corretamente. Quando está presente uma descarga em cordão, está a ocorrer uma sobrecarga do *apex*, por sua vez se a descarga for em *spray* significa que o *apex* é demasiado grande, permitindo a que o *underflow* se apresente demasiado diluído. Uma descarga ideal apresenta-se em cone, garantindo que foi realizado o correto dimensionamento do *apex*.

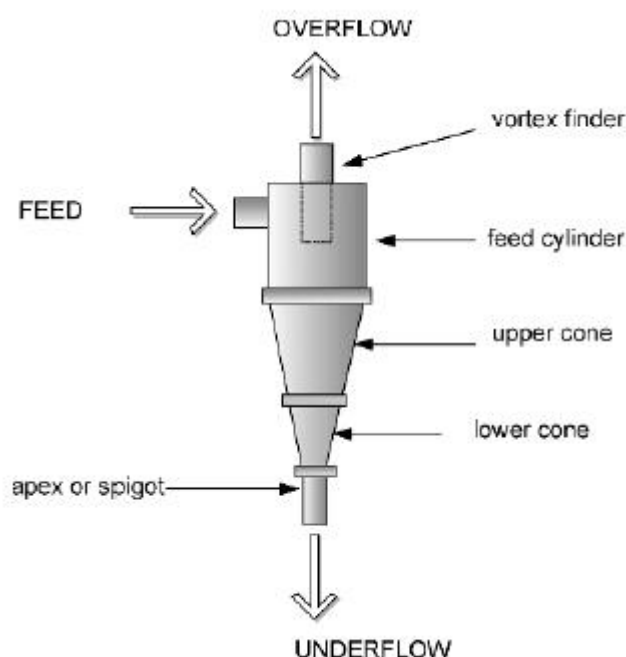


Figura 2.4 – Esquema hidrociclone (Gupta & Yan, 2006)

2.6.2. ESPESSADORES E CLARIFICADORES

O mecanismo de funcionamento dos espessadores e clarificadores difere dos hidrociclones, referidos previamente, na medida em que utiliza a força gravítica para fazer uma separação de partículas de acordo com as suas densidades, ficando um líquido clarificado de *overflow* superiormente. Estes equipamentos podem ser utilizados em diversas fases durante o processamento de minérios.

Neste processo são utilizadas substâncias como o caso dos flocculantes. A sua ação consiste na otimização do funcionamento dos espessadores, a partir da formação de vários aglomerados de partículas - com base em partículas mais pequenas isoladas - que acabarão por precipitar.

Relativamente aos subtipos deste equipamento, temos: convencionais, de alta capacidade e de densidade elevada. Em comum possuem um tanque circular, com braços em rotação constante, que permitem o movimento da descarga em direção a um orifício central, bem como a formação de um *overflow* na zona periférica - que é retirado por bombeamento.

Existem três tipos de espessadores:

- Espessadores Convencionais;
- Espessadores de taxa elevada;
- Espessadores de elevada densidade;

Os espessadores convencionais são dotados de dimensões que podem ser consideradas superiores aos restantes, sendo que o seu desempenho pode dispensar o uso de flocculantes. Desta forma, podemos afirmar que a sua aquisição pode acarretar custos elevados, contudo o seu funcionamento, por não necessitar de mais produtos, é acessível.

No caso dos espessadores de alta capacidade, são mais pequenos e o seu funcionamento ocorre por intermédio de lamas associadas a elevadas concentrações de floculantes.

Os espessadores de elevada densidade são considerados tanques com mais profundidade, caracterizam-se por um movimento de auto-compressão, que por sua vez provoca um aumento na densidade da polpa em questão, podendo ser superior a 70% do valor inicial.

Assim, para ocorrer uma descarga deste produto têm de ser utilizadas bombas específicas para o efeito. Esta atuação torna-se impensável, quando o objetivo deste processamento passa pela conservação de água, tal como formação de pastas que necessitam a incorporação de água.

Os clarificadores consistem em espessadores, cuja base de atuação acontece em correntes de sólidos diluídos, com a colocação de floculantes para auxiliar na formação de um precipitado, separando-se um *overflow* límpido. Podem ser considerados semelhantes aos espessadores, contudo os últimos centram a sua atenção na concentração do *underflow*, ao invés da tonalidade do *overflow*.

3

DIMENSIONAMENTO

Neste capítulo, vai ser abordado o dimensionamento clássico de todos os equipamentos que vão ser introduzidos na plataforma. O objetivo passa por reunir todas as etapas necessárias para realizar o dimensionamento de um dado equipamento, promovendo a fácil introdução no software desenvolvido.

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica, onde foram consultados diversos catálogos com o intuito de aferir a melhor solução para o dimensionamento.

3.1. FRAGMENTADOR DE MAXILAS

Relativamente ao seu dimensionamento, os fragmentadores de maxilas possuem geometrias dependentes do calibre máximo admissível, tendo em conta as contrições geométricas deste tipo de fragmentadores.

As características geométricas como a câmara de fragmentação e o movimento das partes fragmentadoras, têm impacto direto no mecanismo de transporte interno. Este consequente impacto resulta num tempo de residência fixo, garantindo a mesma relação de redução, normalmente entre 4:1 a 8:1, no caso dos fragmentadores de cones (Leite, 1986).

O calibre máximo admissível condiciona a dimensão da boca do fragmentador, sendo esta ajustada para garantir a possibilidade de entrada de material. Esta dimensão da boca vai determinar um volume útil da câmara de fragmentação.

Com esta limitação, a capacidade será diretamente proporcional a esse volume, tal como demonstrado pela equação 3.1.

$$\text{Capacidade (caudal volúmico máximo)} = \frac{1}{\text{Tempo de residência}} \times \text{Volume útil} \quad 3.1$$

Posto isto, como a geometria dos fragmentadores é fixa, pode-se constatar que existe uma relação linear entre a capacidade e o calibre máximo admissível, expressa na equação 3.2.

Sendo que, o valor de K é dependente da forma geométrica de cada câmara de fragmentação:

$$\text{Capacidade} = K \times \frac{1}{\text{Tempo de residência}} \times \text{Calibre máximo} \quad 3.2$$

As relações geométricas de um fragmentador de maxilas dependem da sua abertura, isto é, da abertura da câmara de fragmentação (Gupta & Yan, 2006).

$$\text{Altura vertical fragmentador} \approx 2 \times \text{Abertura} \quad 3.3$$

$$1,3 \times \text{Abertura} < \text{Largura da maxila} < 3 \times \text{Abertura} \quad 3.4$$

$$\text{Deslocamento} = 0,0502 \times (\text{Abertura})^{0,85} \quad 3.5$$

No caso do cálculo da capacidade, existem diversos autores que relacionam a sua geometria para efetuar essa operação. Neste trabalho foi utilizado um gráfico, Figura 3.1, que representa diversas retas que permitem obter a capacidade, as potências média e máxima e o peso em função do calibre máximo admissível, ou seja, de abertura de entrada e da relação de redução operada.

3.2. FRAGMENTADOR DE CONES

Os fragmentadores de cones apresentam o mesmo método de dimensionamento, diferindo apenas no cálculo geométrico. Segundo Gupta e Yang (2008), para esse cálculo é utilizada a abertura do fragmentador, sendo que quando a abertura é menor que 66 cm, utiliza-se a equação 3.6, quando a abertura é maior que 66 cm, utiliza-se a equação 3.7.

$$8 \times \text{Abertura} \leq L_E \leq 10 \times \text{Abertura} \quad 3.6$$

$$6,5 \times \text{Abertura} \leq L_E \leq 7,5 \times \text{Abertura} \quad 3.7$$

$$L_E = 2 \times \pi \times (\text{raio médio da descarga}) \quad 3.8$$

No que toca à capacidade, é utilizado o mesmo método apresentado nos fragmentadores de maxilas. Os ábacos utilizados são apresentados na Figura 3.1.

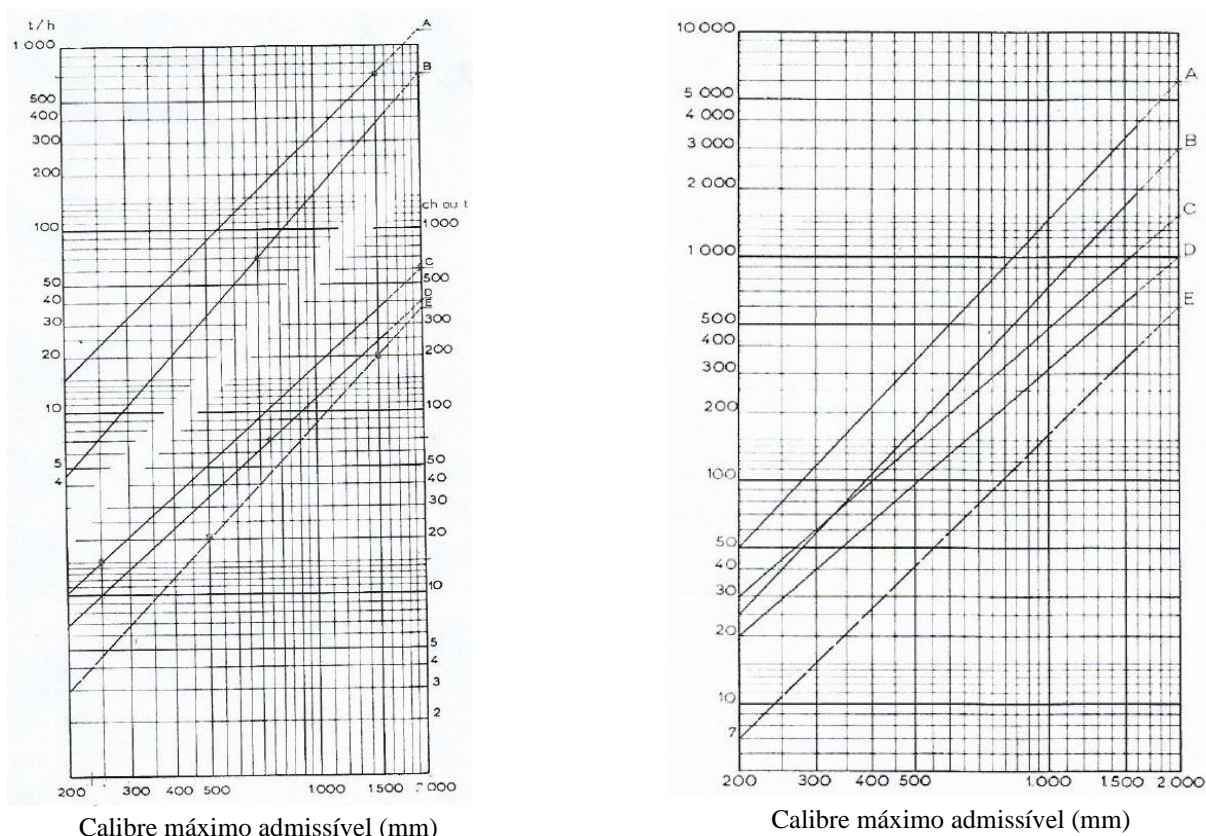


Figura 3.1 – Características dos fragmentadores maxilas (Blake) e de cones (Testut, 1958)

Na figura da esquerda, as retas A e B permitem determinar a capacidade do fragmentador, em toneladas por horas, para o mesmo calibre máximo admissível, quando este trabalha com uma relação de redução diferentes, 4:1 e 8:1 respetivamente. As retas C e D correspondem à potência instalada máxima e médias, em cv, respetivamente. No caso da reta E, consiste no seu peso, expresso em toneladas. Todas as retas são obtidas tendo em conta o calibre máximo admissível.

No caso do ábaco dos fragmentadores de cones, as retas assumem a mesma designação, contudo a relação de redução muda sendo agora 5:1 e 8:1.

3.3. MOINHOS

O dimensionamento de moinhos é normalmente baseado no consumo energético da moagem. O método que vai ser utilizado neste trabalho é o método de *Bond*. Este procedimento é o mais utilizado, na medida em que permite a obtenção de resultados com elevada aproximação do paradigma real, considerando as operações de moagem habituais.

Na equação 3.9 está representado o cálculo do consumo específico da energia de moagem (Beraldo, 1987).

$$W = 10 \times WI \times (P^{-0,5} - F^{-0,5}) \times EF_i \quad 3.9$$

Em que:

W – Energia consumida (kWh/t)

WI – Work-Index (kWh/t)

P – Diâmetro em que passa 80% da massa do produto (micron)

F – Diâmetro em que passa 80% da massa da alimentação (micron)

EF_i – Fatores de correção

A aplicação deste método consiste na seleção de um moinho padrão com geometria e potência conhecida. Posteriormente, são aplicados fatores de correção com o intuito de aproximar a geometria do moinho padrão à geometria requerida.

Em relação à sua geometria, os fabricantes produzem moinhos com diâmetros padronizados, contudo com comprimento variável de acordo com as necessidades.

Tabela 3.1– Potência de moinhos de bolas tipo overflow (Rowland)

Diâmetro I.C (m)	Comprimento (m)	Potência (kW)	Diâmetro I.C (m)	Comprimento (m)	Potência (kW)
0,91	0,91	5	3,66	3,66	644
1,22	1,22	15	3,81	3,66	711
1,52	1,52	34	3,96	3,96	842
1,83	1,83	63	4,12	3,96	943
2,13	2,13	108	4,27	4,27	1090
2,44	2,44	170	4,42	4,27	1183
2,59	2,44	198	4,57	4,57	1354
2,74	2,74	255	4,72	4,57	1457
2,89	2,74	291	4,88	4,88	1652
3,05	3,05	366	5,03	4,88	1766
3,2	3,05	411	5,18	5,18	2059
3,35	3,35	484	5,33	5,18	2182
3,51	3,35	535	5,49	5,49	2441

Tabela 3.2 – Potência de moinhos de barras tipo overflow (Rowland)

Diâmetro I.C (m)	Comprimento (m)	Potência (kW)	Diâmetro I.C (m)	Comprimento (m)	Potência (kW)
0,91	1,22	6	3,2	4,57	486
1,22	1,83	19	3,35	4,88	587
1,52	2,44	45	3,51	4,88	654
1,83	3,05	91	3,66	4,88	724
2,13	3,35	145	3,81	5,49	874
2,44	3,66	220	3,96	5,79	1010
2,59	3,66	254	4,12	5,79	1107
2,74	3,66	275	4,27	6,1	1263
2,89	3,96	332	4,42	6,1	1371
3,05	4,27	405	4,57	6,1	1481

A primeira etapa no dimensionamento passa por calcular a energia de moagem, sendo que este cálculo é realizado sem qualquer fator de correção. De seguida, procede-se ao cálculo da potência total requerida, que se obtém através da multiplicação da energia de moagem pela capacidade.

$$P = W \times C \quad 3.10$$

Em que:

P – Potência necessária (kW)

W – Energia consumida (kWh/t)

C – Capacidade (t/h)

Com a potência necessária calculada recorremos as tabelas de potências, selecionando o moinho padrão.

De seguida, com as geometrias do moinho padrão selecionado, calculam-se os fatores de correção necessários, garantindo a aproximação às condições de operação desejadas.

A aplicação deste tipo de dimensionamento deve ser realizada com a utilização de fatores de correção de *Rowland*, contudo estes valores são baseados em resultados obtidos de moinhos industriais, sendo necessárias para esse efeito regressões. Estes fatores são posteriormente aplicados em moinhos de bolas, em circuito aberto e fechado, e moinhos de barras em circuito aberto.

O primeiro fator a utilizar é o fator de moagem a seco. Este é representado por EF_1 e consiste em igualar o mesmo a 1,3, quando estamos na presença de moagem a via seca. A sua aplicabilidade deve-se ao facto de este tipo de moagem apresentar uma eficiência inferior.

O segundo fator é utilizado quando nos encontramos perante um circuito aberto em moinho de bolas. Este tipo de circuito tem maiores gastos energéticos, face ao circuito fechado, para produtos iguais. A sua especificação, em circuito aberto, deve ser realizada tendo em conta a percentagem retida numa determinada malha de controlo, daí o fator ser determinado através da percentagem retida na malha de controlo. Na Tabela 3.3 estão discriminados os vários fatores de ineficiência tendo em conta a percentagem de passados da malha de controlo.

Tabela 3.3 – Fator de ineficiência em circuito aberto (Rowland)

% de passados na malha de referência (micron)	Fator de ineficiência
50	1,035
60	1,05
70	1,1
80	1,2
90	1,4
92	1,46
95	1,57
98	1,7

O fator seguinte a ser aplicado é o fator do diâmetro, EF_3 e representa o aumento da eficiência do moinho até um diâmetro de 3,81 m. Após este diâmetro a eficiência mantém-se igual. Este fator é representado pela equação 3.11.

$$EF_3 = \left(\frac{2,44}{D} \right)^{0,2} \quad 3.11$$

Em que:

D – Diâmetro do moinho (m)

Este fator também está representado na Tabela 3.4. onde está discriminado para diâmetros inferiores a 3,81 metros. Quando o diâmetro do moinho é superior, o fator eficiência assume sempre o mesmo valor, sendo igual a 0,914.

Tabela 3.4 – Fator de eficiência do diâmetro do moinho (Rowland)

Diâmetro I.C (m)	Diâmetro I.R (m)	Fator eficiência	Diâmetro I.C (m)	Diâmetro I.R (m)	Fator eficiência
0,914	0,79	1,250	2,90	2,74	0,977
1,00	0,88	1,230	3,00	2,85	0,970
1,22	1,10	1,170	3,05	2,90	0,966
1,52	1,40	1,120	3,20	3,05	0,956
1,83	1,71	1,075	3,35	3,2	0,948
2,00	1,82	1,060	3,51	3,35	0,939
2,13	1,98	1,042	3,66	3,51	0,931
2,44	2,29	1,014	3,81	3,66	0,923
2,59	2,44	1,000	3,96	3,81	0,914
2,74	2,59	0,992	> 3,96	> 3,81	> 0,914

Quando na alimentação do moinho se encontram partículas demasiado grandes para serem moídas de forma eficiente, é necessário aplicar o fator de *oversize*. Este fator, representado por EF_4 , é utilizado quer no moinho de bolas, quer no moinho de barras e é definido pela equação 3.12.

$$EF_4 = \frac{R_r + (WI - 7) \left(\frac{F - F_0}{F_0} \right)}{R_r} \quad 3.12$$

Em que:

F_0 – Tamanho ótimo da alimentação

F – Diâmetro em que passa 80% da massa da alimentação (micron)

R_r – Relação de redução

O tamanho ótimo para a alimentação - F_0 , é definido segundo a equação 3.13 , para moinhos de barras e na equação 3.14 para moinho de bolas.

$$F_0 = 16000 \left(\frac{13}{WI} \right)^{0,5} \quad 3.13$$

Em que:

F_0 – Tamanho ótimo da alimentação

WI – Work-Index (kWh/t)

$$F_0 = 4000 \left(\frac{13}{WI} \right)^{0,5} \quad 3.14$$

Em que:

F_0 – Tamanho ótimo da alimentação

WI – Work-Index (kWh/t)

A relação de redução é definida pela equação 3.15.

$$R_r = \frac{F}{P} \quad 3.15$$

Em que:

P – Diâmetro em que passa 80% da massa do produto (micron)

F – Diâmetro em que passa 80% da massa da alimentação (micron)

De acordo com Bond, quando a alimentação ao moinho possui mais de 80% de granulometria inferior a 74 micron, utiliza-se o fator EF_5 . Este fator é calculado através da equação 3.16.

$$EF_5 = \frac{P + 10,3}{1,145 P} \quad 3.16$$

Em que:

P – Diâmetro em que passa 80% da massa do produto (micron)

O seguinte fator a ser introduzido é o EF_6 , que consiste na aplicação de um fator tendo em conta a relação de redução do moinho de barras em circuito aberto. Para isso é necessário obter a relação de redução ótima, que é definida pela equação 3.17.

$$R_{r0} = 8 + \frac{5L}{D} \quad 3.17$$

Em que:

L – Comprimento das barras (metros)

D – Diâmetro interno do moinho ao revestimento (metros)

Depois de obtida a relação de redução ótima, R_{r0} , deve ser aplicado o fator de correção se a relação de redução estiver fora do intervalo $R_{r0} - 2 \leq R_r \leq R_{r0} + 2$. Para isso é utilizada a equação 3.18.

$$EF_6 = 1 + \frac{(R_r - R_{r0})^2}{150} \quad 3.18$$

Em que:

R_r – Relação de redução

R_{r0} – Relação de redução ótima

A sua utilização nem sempre é necessária, contudo é aconselhado o seu uso sempre que o *work index* do minério for superior a 7.

Quando o moinho trabalha com relação de redução inferiores a 6, o que é muito raro, deverá ser usado um outro fator. No caso dos moinhos, relações de redução desta ordem apenas são usadas em operações de remoagem. Na equação 3.19 permite obter o fator correspondente, EF_7 .

$$EF_7 = \frac{2(R_r - 1,35) + 0,26}{2(R_r - 1,35)} \quad 3.19$$

Em que:

R_r – Relação de redução

O fator EF_8 é utilizado tendo em conta a forma de preparação do material que alimenta o moinho. Este fator é bastante variável, sendo que na Tabela 3.5 estão representados os vários valores de fator utilizados.

Tabela 3.5 – Fator EF_8 para diferentes tipo de alimentação

Moinho de barras em circuito único, aberto	EF_8
Alimentação proveniente de um circuito de britagem em circuito aberto	1,4
Alimentação proveniente de um circuito de britagem em circuito fechado	1,2
Moinho de barras em circuito barras/bolas	EF_8
Alimentação proveniente de um circuito de britagem em circuito aberto	1,2
Alimentação proveniente de um circuito de britagem em circuito fechado	1

Após a identificação de todos os fatores de correção, a potência do moinho (ou moinhos) será recalculada de seguida. Este cálculo é realizado com o intuito de proceder ao dimensionamento do novo comprimento do moinho. O comprimento é então obtido pela Equação 3.25.

$$L = \frac{\text{Potência corrigida}}{\text{Potência do moinho padrão}} \times \text{Comprimento do moinho padrão} \quad 3.20$$

Em que:

L – Comprimento do moinho (m)

Posto isto, é possível obter o moinho devidamente dimensionado, tendo em conta as necessidades.

3.4. CRIVOS

No dimensionamento de crivos existem diversas formas que vão desde métodos empíricos, baseados em correlações obtidas de diversos equipamentos, até aos testes laboratoriais. O método de dimensionamento abordado será o método empírico. Este método, representado pela equação 3.21, permite o cálculo da área necessária de crivagem.

$$A = \frac{Q_u \times S}{Q_{spec}} \quad 3.21$$

Em que:

A – Área de crivagem requerida (m^2)

Q_u – Caudal *undersize* na Alimentação (t/h)

Q_{spec} – Capacidade específica do crivo (t/h/ m^2)

S – Fator de segurança

A capacidade específica do crivo é obtida através da equação, que resulta na multiplicação de diversos fatores que irão ser abordados posteriormente.

$$Q_{spec} = A \times B \times C \times D \times E \times F \times G \times H \times I \times J \times K \times L \quad 3.22$$

O fator A corresponde à capacidade básica para a separação requerida, o fator B diz respeito às frações de *oversize* existentes na separação e o fator C relaciona-se com a percentagem de material menor que a metade do calibre requerido na separação. Estes fatores estão representados sob a forma de gráficos.

O fator de segurança S varia entre 1 e 1,4, dependendo do conhecimento do material e das condições operatórias, sendo que, quando confiáveis, o fator S assume o valor de 1. Os restantes fatores são discriminados nas tabelas seguintes.

Posição do deck	1	2	3	4
Fator D	1	0,9	0,8	0,7

Separação desejada (mm)	1 - 6	6 - 12	12 - 25	26 - 40	41 - 50	51 - 75	+75
Fator E	1.4	1,3	1,25	1,2	1,15	1,1	1

Densidade do sólido (t/m^3)	1	2	3
Fator F	0,5	1	2

Abertura	Redonda	Quadrada	Retangular
Fator H	0,9	1	1,05

Forma da partícula	Redonda			Cúbica			Lasca	
Fator I	1,2			1			0,9	

Eficiência	70	75	80	85	90	92	94	96
Fator J	1	0,9	0,8	0,7	1	0,98	0,95	0,9

Humidade %	< 3			3 - 5			6 - 8	
Fator L	1			0,85			0,75	

Deck	Horizontal		Inclinado			Inclinação múltipla			
	Reto		Reto			Multi	Triplo	Dual	
Vibração	Linear	Elíptica	Circular	Elíptica variável	Linear	Linear	Elíptica variável	Linear	Elíptica variável
Fator K	0,9	1,1	1	1,1	1	1,3	1,4	1,1	1,3

No caso do fator G é utilizada a equação 3.23.

$$Fator\ G = \frac{Area\ aberta\ real\ \%}{50\%} \quad 3.23$$

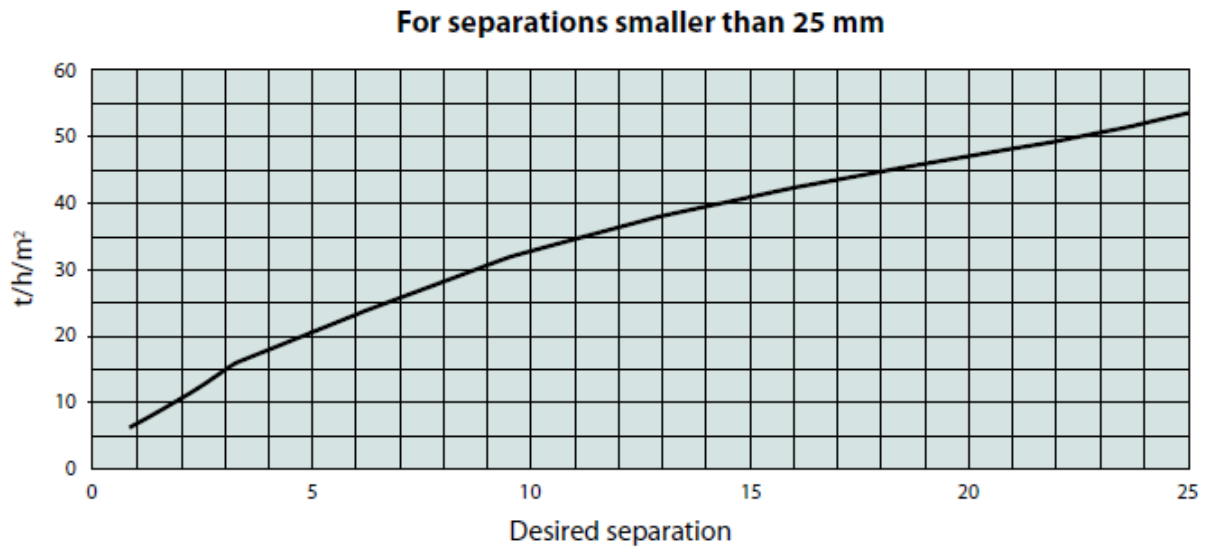


Gráfico 3.1 – Gráfico do fator A para granulometrias menores que 25 mm (Metso, 2014)

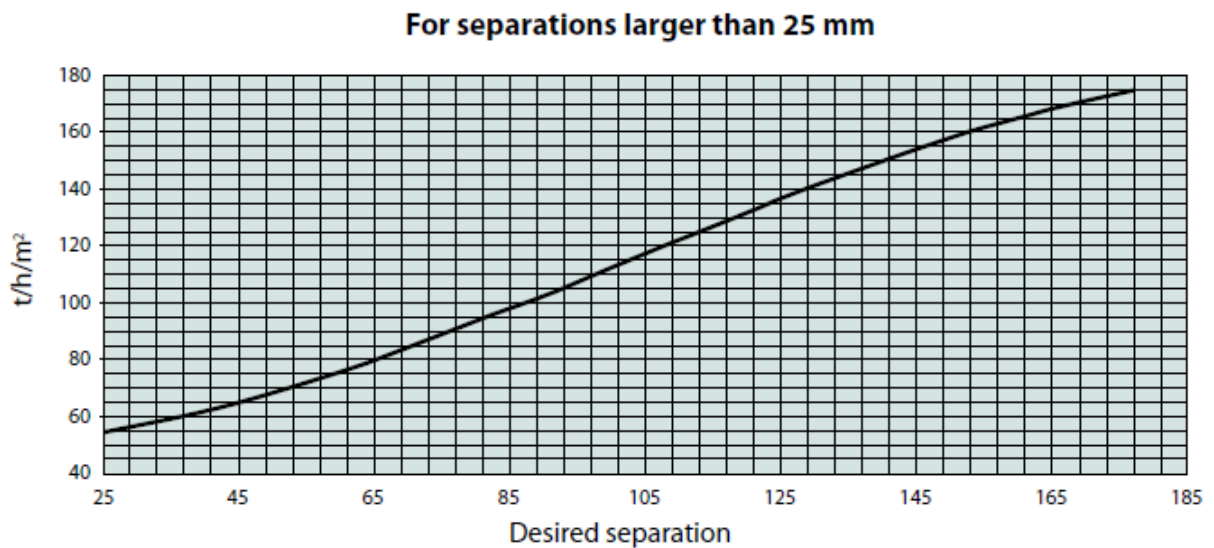


Gráfico 3.2 – Gráfico do fator A para granulometrias maiores que 25 mm (Metso, 2014)

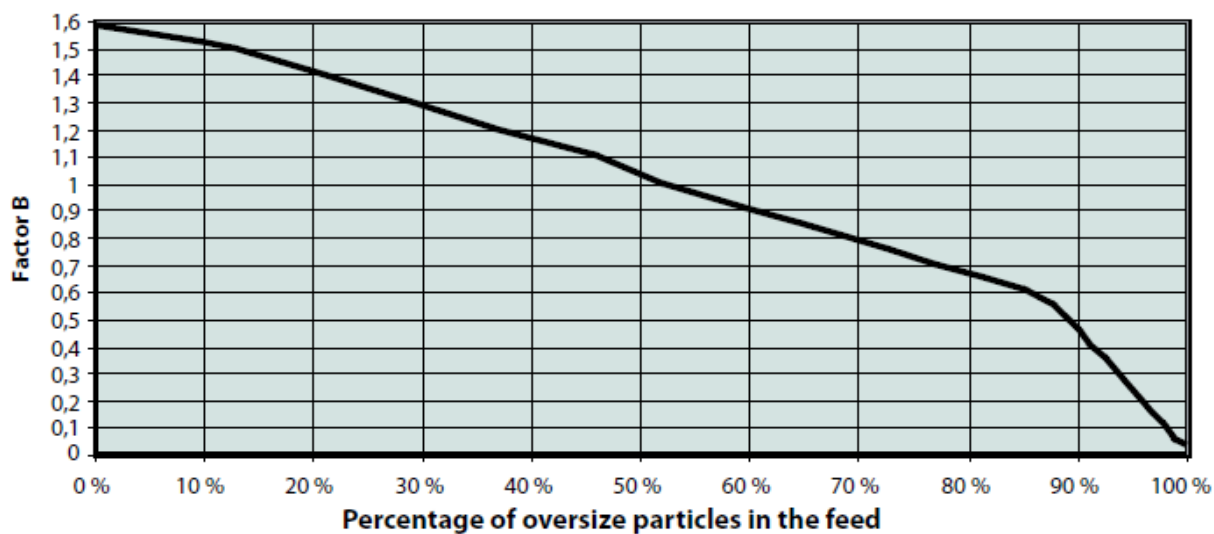


Gráfico 3.3 – Gráfico do fator B (Metso, 2014)

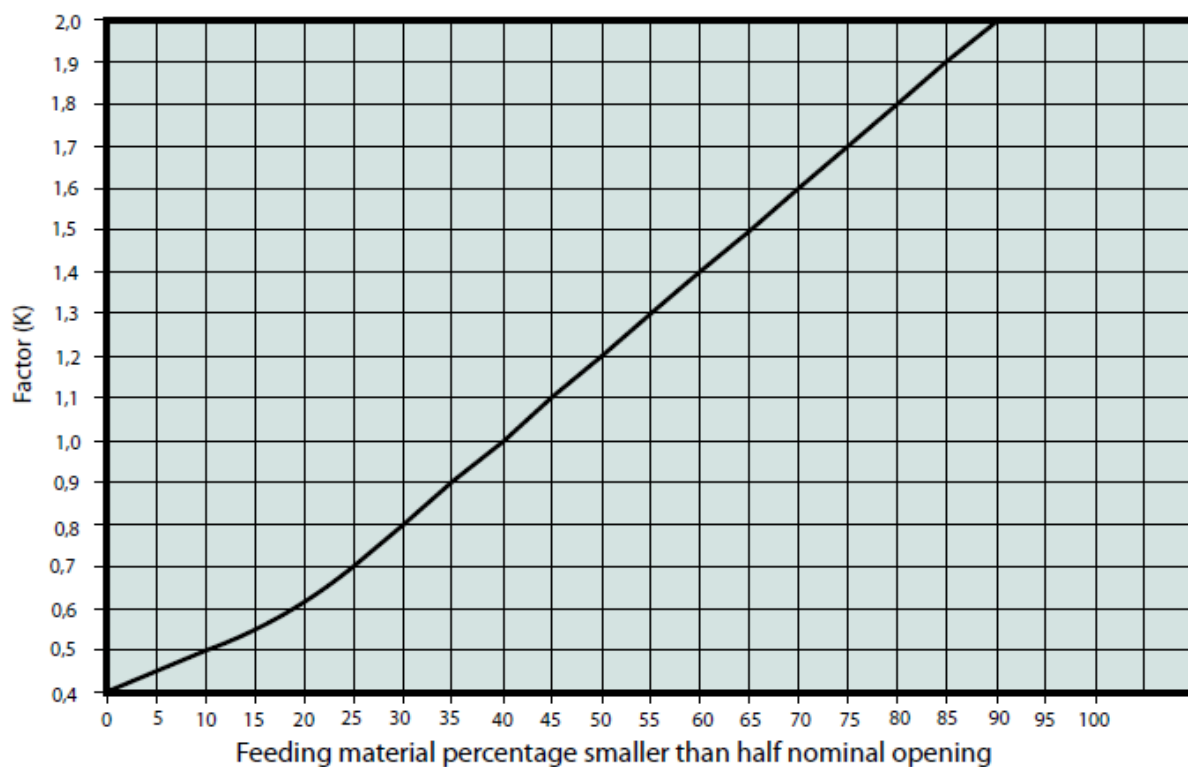


Gráfico 3.4 – Gráfico do fator C (Metso, 2014)

Com os passos anteriormente apresentados consegue-se com alguma facilidade executar o dimensionamento de um crivo, tendo em conta as condições iniciais.

3.5. HIDROCICLONES

O dimensionamento deste equipamento é realizado tendo em conta um ciclone padrão. Inicialmente é realizado o cálculo da estimativa do $D50_C$, com o intuito da obtenção do produto especificado. Para realizar esta estimativa é necessário recorrer à Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Relação do $D50_C$ com a granulometria desejada (Arterburn, 1882)

Granulometria requerida (% de passados na malha de referência)	Fator de multiplicação
98,8	0,54
95	0,73
90	0,91
80	1,25
70	1,67
60	2,08
50	2,78

Para efetuar o cálculo, deve ser selecionada a granulometria requerida obtendo o fator de multiplicação correspondente. Esse fator de multiplicação é então multiplicado pela granulometria de referência, obtendo assim uma estimativa do valor do $D50_C$.

De seguida, é necessário calcular os fatores de correção para, posteriormente, ser possível calcular uma estimativa do valor $D50_C$ (básico). Os fatores de correção são utilizados para aproximar o ciclone padrão a um ciclone ajustado às necessidades requeridas. Os fatores servem para corrigir a percentagem de sólidos em volume (C_1), fator de correção de pressão (C_2) e fator de correção da densidade do sólido (C_3).

Para o cálculo do fator C_1 recorre-se à equação 3.24, onde Olson e Turner estenderam o método de Arterburn's, que é baseado na curva padrão.

$$C_1 = \left[\frac{53 - V}{53} \right]^{-1,43} \quad 3.24$$

Em que:

V – Percentagem de sólidos em volume

O segundo fator de correção, (C_2), consiste em corrigir a queda de pressão, para isso é utilizada a equação 3.25.

$$C_2 = 3,27 \times P^{-0,28} \quad 3.25$$

Em que:

P – Pressão (kPa)

C_3 consiste no fator de correção para a densidade, calculado pela equação 3.26.

$$C_3 = \left[\frac{1,65}{\rho - 1} \right]^{0,5} \quad 3.26$$

Em que:

ρ – Densidade do sólido

Depois de realizado o cálculo dos fatores de correção, procede-se ao cálculo do diâmetro do ciclone. Para isso é necessário o cálculo do $D50_c$ (básico), através da equação 3.27.

$$D50_c(básico) = \frac{D50_c}{C_1 \times C_2 \times C_3} \quad 3.27$$

Em que:

C_1 , C_2 e C_3 – Fatores de correção

De seguida é necessário conhecer o diâmetro do ciclone que satisfaça o $D50_c$ (básico), obtido pela equação 3.28.

$$D_c = 0,206 \times D50_{c(Básico)}^{1,515} \quad 3.28$$

Com o intuito de calcular o número de ciclones necessários, recorre-se ao valor anteriormente calculado e à pressão de trabalho do ciclone. Com estes dados, procede-se ao desenho de um gráfico que relaciona a pressão com a capacidade do ciclone, tendo em conta o diâmetro indicado.

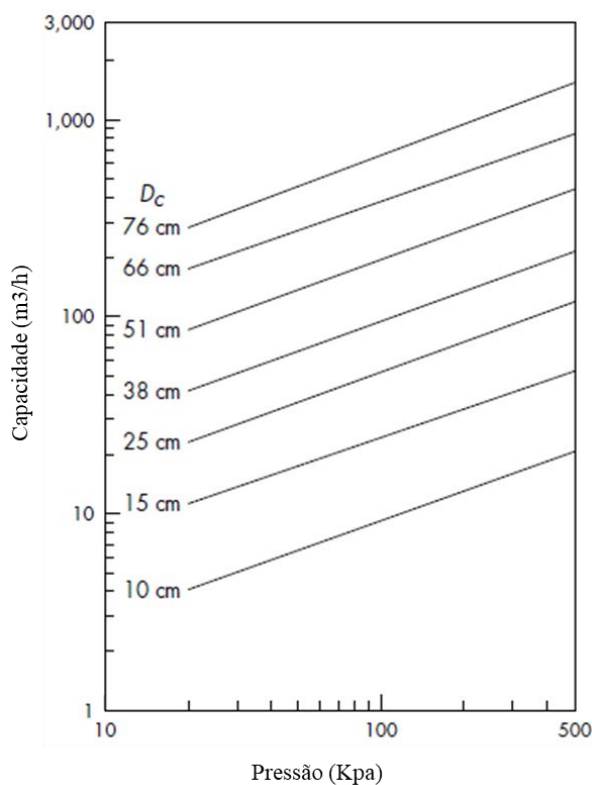
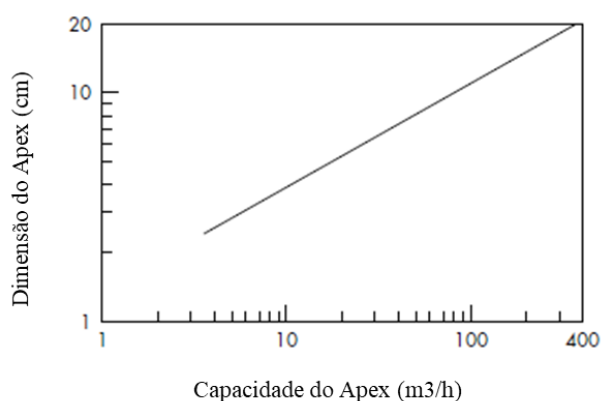


Gráfico 3.5 – Relação entre pressão e capacidade (Arterburn, 1882)

Com a obtenção da capacidade de um único ciclone, é possível calcular a quantidade necessária de equipamentos tendo em conta o caudal de polpa que alimenta o circuito.

O último passo do dimensionamento consiste em selecionar a dimensão do *apex*. Para isso é necessário conhecer o caudal de polpa do *underflow*, cujo valor é dividido pelo número de ciclones necessário, obtendo o caudal por cada unidade. Posteriormente recorre-se a um gráfico que relaciona a capacidade do *apex* com a dimensão do mesmo.

Gráfico 3.6 – Relação entre a capacidade do *apex* e a sua dimensão (Arterburn, 1882)

Com estes dados será possível realizar o correto dimensionamento de um hidrociclone, contudo, depois de instalados e em operação, poderão ser realizados ajustes.

3.6. DECANTADORES

Para realizar o dimensionamento de um decantador podem ser calculados o seu diâmetro e volume, respeitantes às capacidades de clarificação e de espessamento, respetivamente.

Para o cálculo da área da superfície é importante mencionar que o valor obtido depende da velocidade de sedimentação, quer das partículas sólidas, quer das líquidas, devendo ser superior à velocidade de subida do líquido (Gasos, Perea, & Jodra, 1957).

Considerando:

y – Peso específico do líquido (kg/m³);

Q – Taxa de alimentação (kg/h);

F – Diluição (kg de líquido/kg de sólido) num momento t_1 ;

D – Diluição (kg de líquido/kg de sólido) num momento t_2 , sendo $t_2 > t_1$.

Assim, pelo balanço entre o líquido em ascensão e a fração sólida vinda da alimentação, temos $F-D$, sendo, por conseguinte, calculado o volume (m³) através da seguinte fórmula:

$$\frac{F - D}{y} \quad 3.29$$

O volume total eliminado por hora é dado por:

$$\frac{F - D}{y} Q \quad 3.30$$

Assumindo A como a área de superfície do decantador, a velocidade de ascensão do líquido (m/h) é determinada por:

$$\frac{F - D}{y} \times \frac{Q}{A} \quad 3.31$$

Por último, sendo a velocidade de sedimentação, R , igual à velocidade de ascensão do líquido, é possível assumir que:

$$R = \frac{F - D}{y} \times \frac{Q}{A} \rightarrow A = Q \times \frac{F - D}{yR} \quad 3.32$$

Concluindo, para o cálculo da área do decantador é imprescindível o conhecimento prévio da velocidade de sedimentação em questão.

No que refere ao cálculo do volume, é importante ter conhecimento do tempo de retenção, bem como do tempo necessário para se atingir a concentração desejada do minério em questão (Gasos et al., 1957).

Assumindo:

y – Densidade da polpa (Kg/m³);

D – Diluição da descarga

Consequentemente, na zona de compressão existe $\frac{D+1}{y} \times Q \text{ m}^3$ de polpa por hora. Desta forma, sendo (t – tc) o tempo de retenção, o volume pode ser calculado pela seguinte equação:

$$\frac{D + 1}{y} * Q * (t - tc) \quad 3.33$$

Considerando:

A – área do espessador;

L – Peso do líquido;

S – Peso do sólido;

ys – Peso específico do sólido;

H, a altura da zona de compressão será dada por:

$$\frac{D + 1}{yA} \times Q \times (t - tc) \quad 3.34$$

Assim:

$$D = \frac{L}{S} = \frac{S + L}{\frac{S}{ys} + \frac{L}{y}} \quad 3.35$$

Procedendo às respetivas substituições na equação 3.35, e pressupondo que L/S assume um valor médio, devido à assunção que a concentração da descarga é igual à concentração média da polpa:

$$H = \left(\frac{1}{ys} + \frac{L}{S} \times \frac{1}{y} \right) \frac{Q(t - tc)}{A} \quad 3.36$$

Ao longo do tempo, na zona de compressão a razão entre líquido e sólido vai variando, obedecendo sempre à regra que o volume ocupado pela polpa é igual á soma dos volumes ocupados pelos sólidos e pelo líquido.

Desta forma, o volume dos sólidos é dado em função de:

$$\frac{Q (t - tc)}{ys} \quad 3.37$$

O volume do líquido depende da variável dt , o tempo em que ocorre compressão, logo depende de Qdt – sólidos que entram em compressão no intervalo de tempo dt .

Por conseguinte, o volume de líquido é dado por:

$$\frac{DQdt}{y} \quad 3.38$$

O volume total corresponde então à soma de todos os volumes durante o tempo de compressão:

$$\int_{tc}^t D * \frac{Q}{y} * dt \quad 3.39$$

Concluindo, o volume na zona de compressão, V , corresponde à soma de todas as partes:

$$V = \frac{Q(t - tc)}{ys} + \int_{tc}^t D * \frac{Q}{y} * dt \quad 3.40$$

Por último, para obtenção da altura do decantador é necessário proceder à soma da zona de compressão com:

- Um comprimento igual à distância entre o local de entrada da alimentação e a sua superfície livre (pode variar entre 30 a 100 cm);
- Um comprimento da forma cônica do fundo (com variação entre 30 a 60 cm).

Usualmente, é ainda adicionado um fator de segurança para permitir armazenamento em caso de interrupções não esperadas. Desta forma, caso a altura seja superior ao espectável, pode ser feito um aumento no diâmetro do tanque.

De forma calcular a velocidade terminal, Cloe e Clevenger conseguiram criar um método capaz de determinar a capacidade de clarificação, (área do decantador) bem como a capacidade de espessamento (volume do tanque).

Para que este método possa ser aplicado, as condições da experiência devem ser mantidas iguais às originais, com controlo apertado do variável tamanho das partículas, temperatura, entre outros que podem afetar a viscosidade da matéria.

Para a sua realização, são necessários entre 6 a 12 provetas graduadas, para fácil leitura das alturas posteriormente. Nestes suportes, devem ser colocadas as amostras de polpa, cujas densidades deverão variar desde colhidas da alimentação até à sedimentação. Por conseguinte, estas amostras são comparadas com uma amostra padrão, anteriormente espessada, sendo procedida uma determinação da quantidade necessária para o ensaio. De seguida, é feita uma homogeneização com decantação posterior da suspensão. Podem neste passo ser adicionados floculantes ao líquido que será adicionado à polpa.

Quando a sedimentação começa a ocorrer, é necessário proceder à leitura da altura da superfície de separação polpa-água, em intervalos de tempo estipulados, para criar um gráfico final com estes

resultados. A partir da análise da curva final, pode-se proceder a uma estimativa da velocidade de sedimentação para cada concentração correspondente, e por último calcular-se a maior área do decantador.

4

DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA

4.1. INTRODUÇÃO

De uma maneira simples, programar consiste em criar uma série de instruções. Para o desenvolvimento da plataforma, foi necessário recorrer a uma linguagem de programação, sendo a utilizada C#.

C# consiste numa linguagem de programação relativamente básica e de fácil compreensão, atual e orientada a um objeto, contudo com suporte para programação orientada a componentes. É considerada uma linguagem, fortemente tipada, permitindo ao utilizador criar diversos aplicativos robustos e seguros, executados no .NET Framework (Sharp, 2015).

Para o desenvolvimento da plataforma foi utilizado um ambiente de desenvolvimento integrado da Microsoft, o Microsoft Visual Studio 2017. Esta ferramenta de desenvolvimento de aplicações possibilita o desenvolvimento de códigos, numa determinada linguagem, para posteriormente serem traduzidos em comandos.

4.2. INTRODUÇÃO DO DIMENSIONAMENTO NA PLATAFORMA

Com a implementação do dimensionamento teórico na plataforma foi necessário realizar alguns ajustes com o intuito de facilitar essa migração. Posto isso foi necessário criar rotinas e ajustes, potenciando a robustez da plataforma.

Com o intuito de facilitar a sua utilização foi ainda criado um ambiente gráfico intuitivo, de uso prático e rápido, que permite facilmente ao utilizador escolher o equipamento a dimensionar de forma mais tecnicamente correta.

Figura 4.1 – Ambiente gráfico da plataforma

4.2.1. FRAGMENTADORES DE MAXILAS

O ambiente gráfico do dimensionamento dos fragmentadores de maxilas conta como entradas o calibre máximo admissível e a relação de redução pretendida. Como resultados, é possível obter a regulação do fragmentador, a sua capacidade, a sua potência máxima e média e a sua geometria. Por fim é apresentado o modelo de fragmentador que melhor se adequa às necessidades.

Figura 4.2 – Interface dos Fragmentadores de Maxilas

Para implementação do dimensionamento deste equipamento na plataforma, foi necessário obter as equações referentes aos gráficos apresentados anteriormente. Foram retirados dois pontos conhecidos de cada gráfico, possibilitando a obtenção da equação da reta.

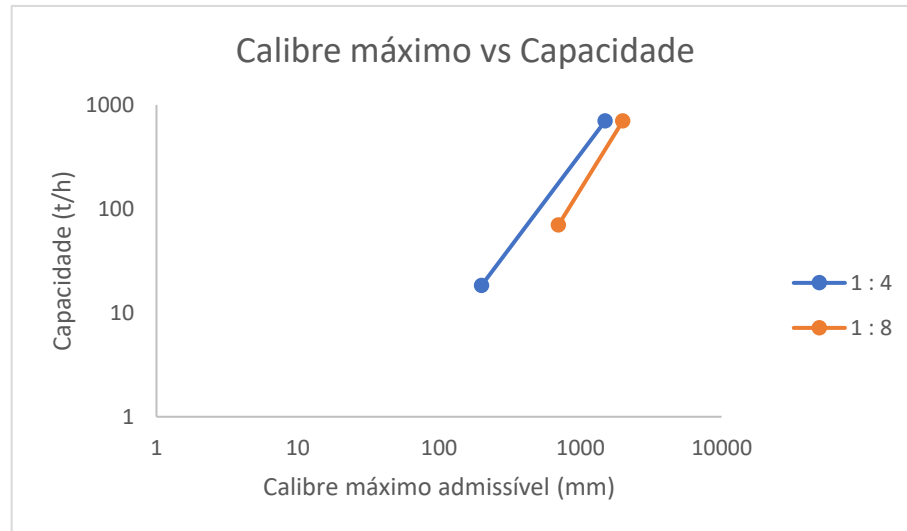


Gráfico 4.1 – Capacidade de um fragmentador de maxilas

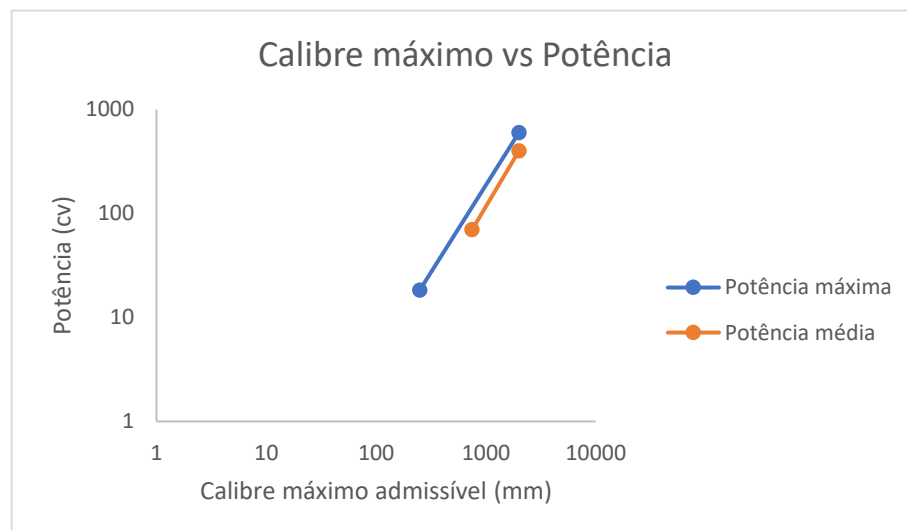


Gráfico 4.2 – Potência de um fragmentador de maxilas

As equações obtidas foram as seguintes:

$$\text{Capacidade RR (4: 1)} = 0,0013 \times x^{1,8077} \quad 4.1$$

$$\text{Capacidade RR (8: 1)} = 0,00004 \times x^{2,1933} \quad 4.2$$

$$\text{Potência média} = 0,0017 \times x^{1,6775} \quad 4.3$$

$$\text{Potência máxima} = 0,0005 \times x^{3,777} \quad 4.4$$

$$\text{Peso} = 0,00004 \times x^{2,0959} \quad 4.5$$

Em que:

x – Calibre máximo admissível (mm)

O funcionamento da ferramenta desenvolvida consiste em introduzir o calibre máximo admissível e a relação de redução desejada, permitindo desencadear as respostas do programa através do botão *Start*. O seu funcionamento passa pela realização do cálculo da regulação, capacidade, potências, peso e geometria mediante o calibre máximo admissível.

Após análise dos resultados, o utilizador verifica se a capacidade apresentada satisfaz a produção desejada. Se responder positivamente a esta questão, a plataforma assume os dados calculados, apresentando o fragmentador mais indicado. Se esta resposta for negativa, existe a possibilidade de introduzir a capacidade desejada, mantendo ou não a mesma regulação.

Figura 4.3 – Interface questão da capacidade

Quando a regulação é mantida, a plataforma recalcula o calibre máximo admissível e percorre todos os modelos de fragmentadores inseridos que satisfazem a nova capacidade, mantendo a mesma regulação. No caso de não ser necessário a mesma regulação, a plataforma recalcula novamente o calibre máximo admissível e posteriormente a nova regulação. Neste momento, a pesquisa é realizada percorrendo todas as regulações, com o intuito de obter a capacidade desejada. Se o modelo que está a ser pesquisado não apresentar a capacidade introduzida pelo utilizador, a plataforma passa ao seguinte, percorrendo novamente as regulações possíveis.

Este dimensionamento conta também com o apoio à decisão entre fragmentadores de maxilas e fragmentadores de cones, remetendo para o utilizador a melhor solução tendo em conta as entradas fornecidas.

Para melhor explicação sobre este processo, na Figura 4.4 está representado o fluxograma do dimensionamento deste equipamento.

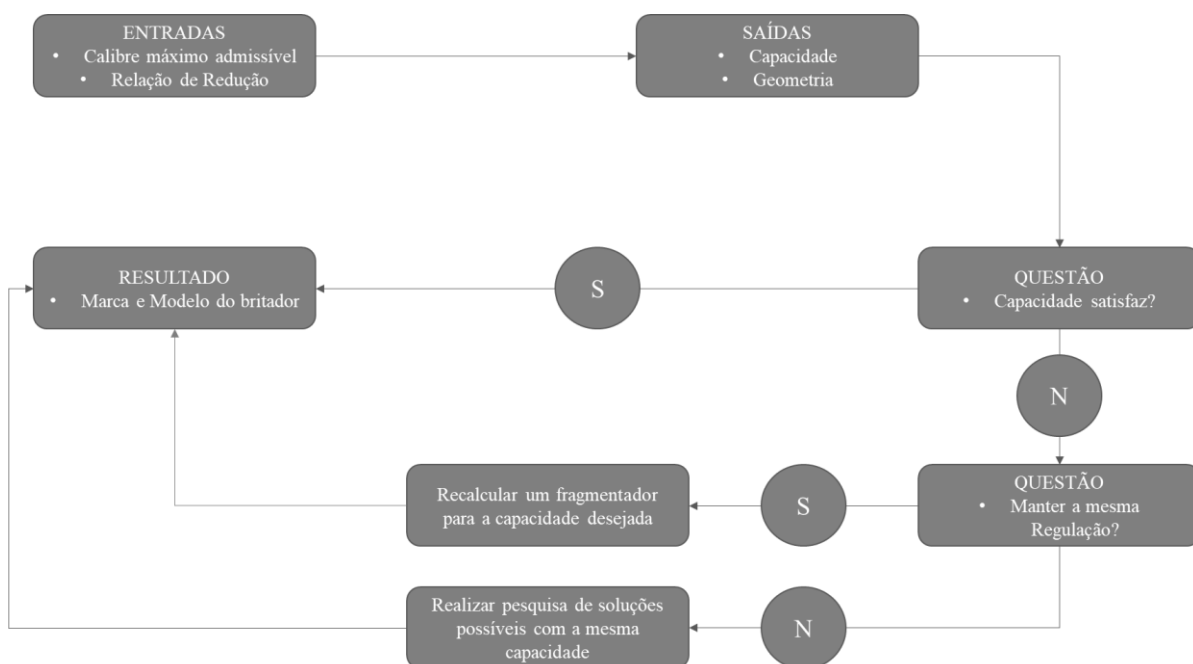


Figura 4.4 – Fluxograma da plataforma (Fragmentador de maxilas)

4.2.2. FRAGMENTADORES DE CONES

Relativamente aos fragmentadores de cones, apresentam os mesmos métodos relativamente à implementação na plataforma, seguindo o mesmo fluxograma apresentado na Figura 4.4. Partilham ainda o mesmo ambiente gráfico, sofrendo alteração na sua geometria.

A principal diferença reside na alteração das equações que possibilitam obter a capacidade, as potências e o peso da unidade fragmentadora. Para isso foi realizada a mesma metodologia utilizada nos fragmentadores de maxilas.

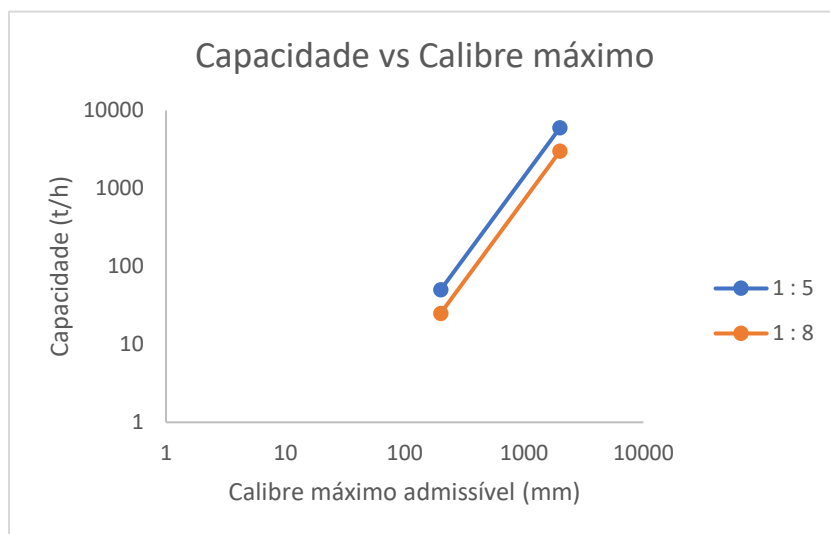


Gráfico 4.2 – Capacidade de um fragmentador de cones

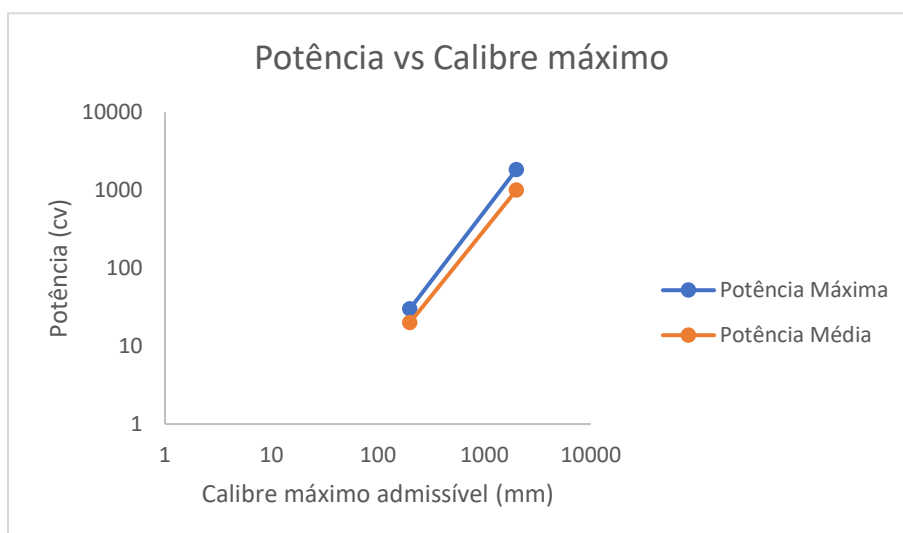


Gráfico 4.3 – Potência de um fragmentador de cones

As equações obtidas foram as seguintes:

$$\text{Capacidade RR (5: 1)} = 0,0008 \times x^{2,0792} \quad 4.6$$

$$\text{Capacidade RR (8: 1)} = 0,0004 \times x^{2,0792} \quad 4.7$$

$$\text{Potência média} = 0,0025 \times x^{1,699} \quad 4.8$$

$$\text{Potência máxima} = 0,0023 \times x^{1,7861} \quad 4.9$$

$$\text{Peso} = 0,00004 \times x^{2,0959} \quad 4.10$$

Em que:

x – Calibre máximo admissível (mm)

4.2.3. MOINHOS

A implementação deste equipamento na plataforma passa pela aplicação do método anteriormente descrito. Como parâmetros de entrada temos a capacidade desejada, em toneladas por hora, o *Work Index*, em quilowatt por tonelada curta, e os tamanhos em que passa 80% no produto e na alimentação, em microns.

O *Work Index* corresponde ao trabalho necessário para reduzir o minério de um tamanho, teoricamente infinito, até a 80% de passados a 100 microns, em quilowatt hora por tonelada curta.

ENTRADAS

Capacidade (t/h)	Wi (kWh/t curta)
<input type="text"/>	<input type="text"/>
Calibre k80 Alimentação (microns)	<input type="checkbox"/> Moagem a seco
<input type="text"/>	<input type="checkbox"/> Circuito aberto
Calibre k80 P. Final (microns)	<input type="checkbox"/> Partículas Grandes na alimentação
<input type="text"/>	

Figura 4.5 – Entradas da plataforma (Moinhos)

Depois dos parâmetros introduzidos, o arranque da plataforma é realizado por intermédio do botão *Start*, dando início ao cálculo da energia necessária. Com o cálculo da energia necessária procede-se ao cálculo da potência, multiplicando a energia anteriormente calculada pela capacidade desejada.

Neste ponto a plataforma procura o moinho padrão que satisfaz a condição de 60% da potência necessária, confirmando potência a potência até admitir a condição. Se a potência não for encontrada,

no caso de potências muito altas, a potência é então dividida por dois, possibilitando a realização de uma nova pesquisa nos moinhos padrão. Esta pesquisa remete para um moinho de menor potência, contudo já estão a ser considerados dois moinhos de potência conjunta igual ou maior do que a potência necessária. A divisão acompanha a potência sempre que não existe na lista um moinho que a comporte, aumentando o número de moinhos consoante essa divisão.

Depois de seleccionado o moinho padrão que satisfaz a potência, realiza-se o cálculo dos fatores de correção correspondentes, resultando uma potência corrigida. Obtida a potência corrigida, vai ser calculado o novo comprimento do moinho.

Este comprimento tem de garantir que a razão entre o comprimento e o diâmetro não seja superior a 1,5. Caso esta condição não se verifique será utilizado o moinho imediatamente superior.

Como saída da plataforma temos então o comprimento e o diâmetro do moinho, a potência corrigida, a relação L/D, o número de moinhos utilizados e a sua potência, e a energia estimada.

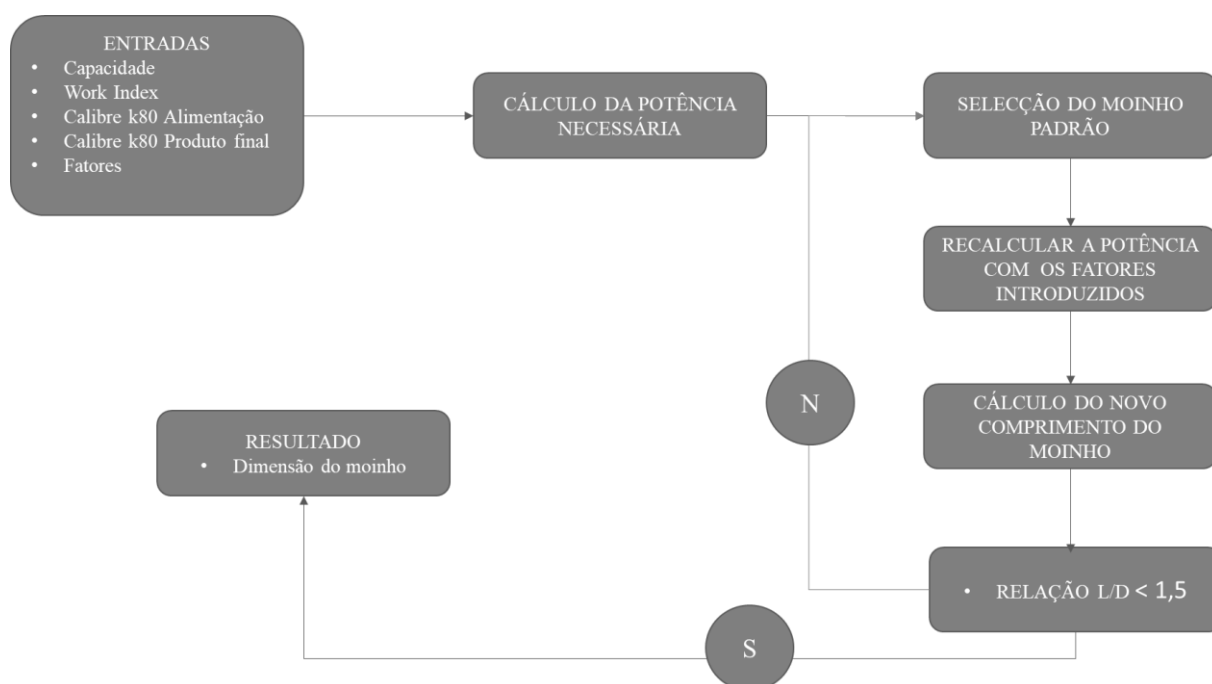


Figura 4.6 – Fluxograma da plataforma (Moinhos)

4.2.4. CRIVOS

No caso dos crivos, a plataforma conta com várias entradas que possibilitam o ajuste do equipamento às necessidades requeridas pelo utilizador. As entradas do sistema contam com as já indicadas anteriormente no dimensionamento teórico.

The screenshot shows a form titled 'ENTRADAS' with the following fields:

- Posição do deck: Text input field.
- Malha (mm): Text input field.
- Capacidade (t/h): Text input field.
- % Undersize: Text input field.
- Humidade: Dropdown menu.
- Densidade sólido: Text input field.
- Fator S: Text input field.
- Forma da partícula: Dropdown menu.
- Eficiência: Dropdown menu.
- Tipo de crivo: Dropdown menu.
- Forma de abertura: Dropdown menu.

Figura 4.7 – Entradas da plataforma (Crivos)

A interface criada permite ao utilizador realizar uma escolha mais seletiva, apresentando várias opções de escolha.

The dropdown menu for 'Tipo de crivo' contains the following options:

- Horizontal c/ Vibração Linear
- Horizontal c/ Vibração Elíptica Constante
- Inclinado c/ Vibração Circular
- Inclinado c/ Vibração Elíptica Variável
- Inclinado c/ Vibração Linear
- Multi Slope c/ Vibração Linear
- Triple Slope c/ Vibração Elíptica Variável
- Dual Slope c/ Vibração Linear
- Dual Slope c/ Vibração Elíptica Variável

Figura 4.8 – Seleção do tipo de crivo (Crivos)

Com o arranque da plataforma são calculados os fatores necessários para se proceder ao dimensionamento. A fim de aumentar a diversidade do dimensionamento foram realizados ajustes a retas padrão dos fatores, possibilitando uma fácil pesquisa dos mesmos para diferentes entradas. Com esse intuito foram obtidas equações dos ajustes gerados.

$$\text{Fator A (+25)} = 0,0013 \times x^{1,8077} \quad 4.11$$

$$\text{Fator A (-25)} = 0,00004 \times x^{2,1933} \quad 4.12$$

$$\text{Fator B} = -0,014 \times \% \text{ Oversize} + 1,7014 \quad 4.13$$

$$\text{Fator D} = -0,1 \times \text{Posição do Deck} + 1,1 \quad 4.14$$

$$\text{Fator F} = 0,3704 \times \text{Densidade} \quad 4.15$$

Depois de todos os fatores calculados é aplicada a equação 3.21 obtendo a área necessária para realizar a crivagem.

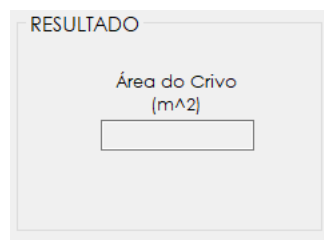


Figura 4.9 – Resultado (Crivos)

No fluxograma seguinte permite demonstrar o funcionamento da plataforma no dimensionamento deste equipamento.

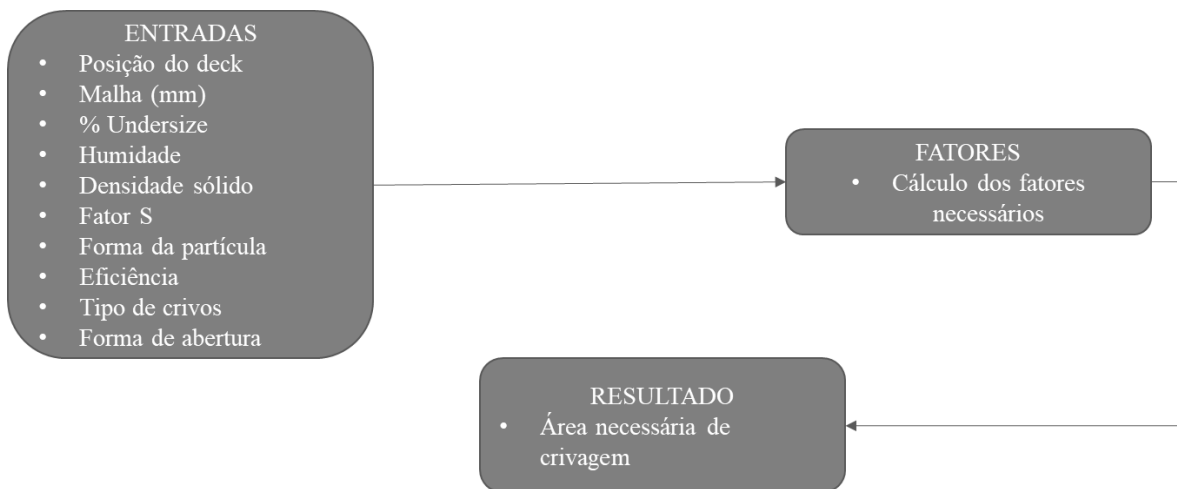


Figura 4.10 – Fluxograma da plataforma (Crivos)

4.2.5. DECANTADOR TANQUE

Como verificado anteriormente, o dimensionamento deste equipamento é acompanhado inicialmente pelo cálculo da velocidade terminal. Este cálculo é gerado através dos resultados obtidos do ensaio de Coe e Clevenger.

Para introdução na plataforma, assume-se como entradas a diluição inicial, a diluição final, e os dados relativamente ao ensaio realizado. Esses dados contam com a altura inicial e final da polpa, e o tempo inicial e final de registo dessas alturas.

Posteriormente, a plataforma realiza os cálculos necessários através das fórmulas referenciadas anteriormente, obtendo assim os resultados.

Os resultados obtidos consistem na área necessária, dada em m^2 por tonelada hora, e a velocidade terminal, expressa em metros por hora. Na figura, podemos visualizar a interface gráfico do dimensionamento deste equipamento.

The interface is titled "Ensaio COE e CLEVENGER" and is divided into three main sections: ENTRADAS, CÁLCULOS, and RESULTADO.

- ENTRADAS:** Contains two input fields: "Diluição Inicial" and "Diluição Final".
- CÁLCULOS:** Contains four input fields: "Altura Inicial (cm)", "Altura Final (cm)", "Tempo Inicial (min)", and "Tempo Final (min)".
- RESULTADO:** Contains two output fields: "Área necessária ($m^2/(t/h)$)" and "Velocidade terminal (m/h)".

A "Start" button is located at the bottom right of the interface.

Figura 4.11 – Interface dos Decantadores

Para melhor interpretação da plataforma criada, foi construído um fluxograma seguinte.

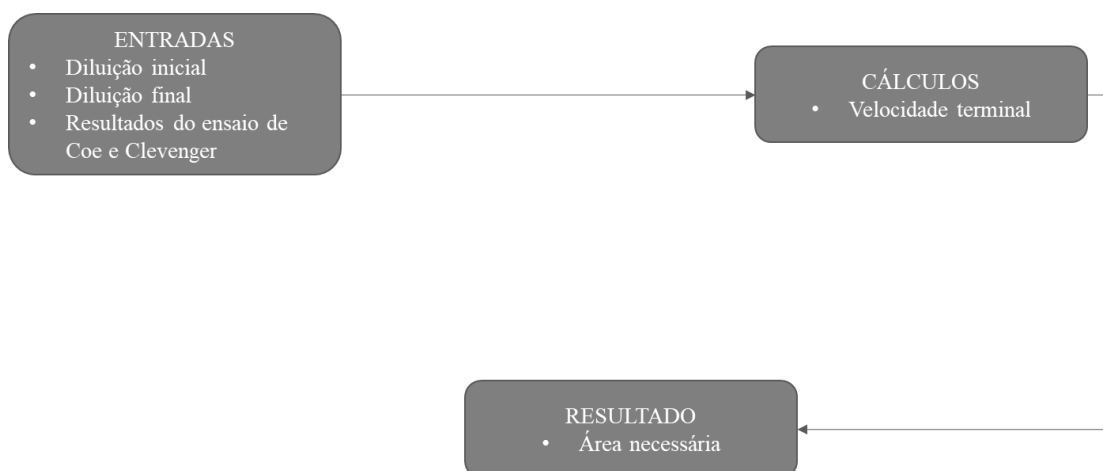


Figura 4.12 – Fluxograma da plataforma (Decantadores)

4.2.6. HIDROCICLONES

Para realização do dimensionamento deste equipamento é necessária a introdução da capacidade da instalação, a carga circulante, a densidade do sólido, a percentagem de passados na malha de controlo, a percentagem de sólidos do produto e do *underflow*, bem como a pressão. Neste caso, este último parâmetro será considerado por padrão igual a 50 kPa, contudo o utilizador é livre de escolher a pressão de trabalho pretendida.

ENTRADAS			RESULTADO	
Capacidade (t/h)	Carga Circulante (%)	Densidade	Caudal Ciclone (m3/h)	Diâmetro Ciclone (cm)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
% Passados	% Sólidos produto		Número de Ciclones	Diâmetro Apex (cm)
<input type="text"/>	<input type="text"/>		<input type="text"/>	<input type="text"/>
Malha (micron)	% Sólidos underflow (estimado)	<input type="checkbox"/> Pressão (kPa)		
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>		
Start				

Figura 4.13 – Interface (Hidrociclone)

Com o início através do botão *Start*, a plataforma realiza todos os balanços de massas necessários para realizar o dimensionamento. De seguida é procedido ao cálculo $D50_c$ de forma a obter o produto especificado. Por conseguinte, são calculados os fatores de correção C_1 , C_2 e C_3 .

BALANÇO DE MASSAS				FATORES
	Overflow	Underflow	Alimentação	Fator multiplicação
Caudal mássico (t/h)	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>
% Sólidos	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	D1
Caudal água (m3/h)	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>
Caudal mássico de polpa (t/h)	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	D2
Caudal volumetrico de polpa	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>
Densidade da polpa	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	D3
% Sólidos em volume	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>	<input type="text" value="0,00"/>
				D50c
				<input type="text" value="0,00"/>
				d50(básico)
				<input type="text" value="0,00"/>

Figura 4.14 – Interface balanço de massas e fatores (Hidrociclones)

Com o cálculo destes fatores é possível obter o $D50_c$ (básico). Com este dado, o programa seleciona o diâmetro do ciclone indicado, tendo em conta os diâmetros de ciclones padrão. Com o diâmetro do

hidrociclone encontrado e a sua pressão, obtém-se o caudal aproximado do hidrociclone, por intermédio de gráficos padrão, possibilitando obter as seguintes equações.

$$\text{Caudal d10} = 10,278 \times x^{0,5091} \quad 4.16$$

$$\text{Caudal d15} = 27,707 \times x^{0,5173} \quad 4.17$$

$$\text{Caudal d25} = 61,971 \times x^{0,5265} \quad 4.18$$

$$\text{Caudal d38} = 110,46 \times x^{0,5135} \quad 4.19$$

$$\text{Caudal d51} = 236,36 \times x^{0,5405} \quad 4.20$$

$$\text{Caudal d66} = 500 \times x^{0,5} \quad 4.21$$

$$\text{Caudal d76} = 434,25 \times x^{0,6898} \quad 4.22$$

Em que:

x – Pressão (PSI)

$d(i)$ – Diâmetro padrão dos hidrociclones (cm)

A este ponto já é possível obter o número requerido de hidrociclones utilizando o caudal de polpa, anteriormente obtido no balanço de massas, e o caudal aproximado do ciclone.

Posteriormente, a plataforma procura calcular o tamanho do *apex*. Como entrada neste passo, é calculado o caudal de *underflow* por cada hidrociclone, utilizando o caudal de polpa de *underflow* inicialmente calculado no balanço de massas.

Com o caudal de *underflow* por cada hidrociclone, é obtido o diâmetro do *apex* por intermédio de uma equação retirada de um ajuste de um ábaco.

$$\text{Diâmetro apex} = 2,6857 \times x^{0,436} \quad 4.23$$

Em que:

x – Caudal *underflow* do hidrociclone (GPM)

A este ponto a plataforma apresenta todos os dados obtidos, assim como os balanços de massa e os fatores de correção utilizados.

RESULTADO

Caudal Ciclone (m ³ /h)	Diâmetro Ciclone (cm)
<input type="text"/>	<input type="text"/>
Número de Ciclones	Diâmetro Apex (cm)
<input type="text"/>	<input type="text"/>

Figura 4.15 – Interface dos resultados (Hidrociclones)

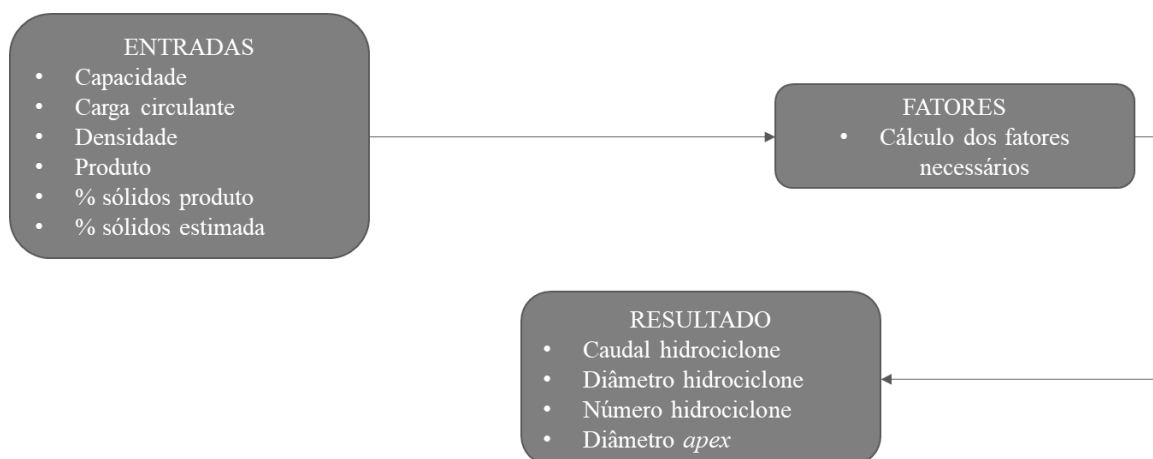


Figura 4.16 – Fluxograma da plataforma (Hidrociclones)

5

EXPLORAÇÃO DA PLATAFORMA

5.1. FRAGMENTADORES

Com o intuito de validar a plataforma criada, foram realizados testes que serão apresentados posteriormente. Para isso foram introduzidas entradas que possibilitavam a sua validação.

Os parâmetros de entrada utilizados consideraram um calibre máximo admissível de 1000 mm e uma relação de redução 4:1.

ENTRADAS

Calibre máximo admissível (mm)

1000

Relação de Redução

4:1

Figura 5.1 – Parâmetros de entrada (Fragmentadores de Maxilas)

Com o início da plataforma foram obtidos os resultados apresentados na Figura 5.2.

RESULTADO

Regulação (mm):

250,00

Capacidade (t/h)

344,38

Potência Máxima (kW)

134,75

Potência Média (kW)

78,80

MODELO BRITADOR

SANDVIK CJ412

METSO C125

Figura 5.2 – Resultados obtidos (Fragmentadores de Maxilas)

Os dados obtidos apresentam dois modelos de britadores passíveis de satisfazer as necessidades de capacidade e regulação. A capacidade apresentada é de 344 toneladas por hora sendo que, no caso do fragmentador SANDVIK CJ412, apresenta uma banda de trabalho de 550 a 720 toneladas por hora. No caso do fragmentador METSO C125, o mesmo apresenta uma banda de trabalho semelhante, 545 a 755 toneladas por hora.

Neste caso, a capacidade dos fragmentadores sugeridos é superior à capacidade necessária para realizar o trabalho. Esta escolha é realizada tendo em conta o primeiro fragmentador que satisfaça esta capacidade, sendo que não existe um equipamento que apresente a capacidade desejada.

De seguida foi implementada uma mudança da capacidade desejada para 900 toneladas hora, mantendo a mesma regulação.

Figura 5.3 – Introdução de uma nova capacidade (Fragmentadores de Maxilas)

Com esta alteração obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Resultados obtidos depois da mudança de capacidade (Fragmentadores de Maxilas)

Como se pode constatar foram sugeridos novos fragmentadores que possibilitam, para a mesma regulação, obter a capacidade pretendida do utilizador. Estes fragmentadores apresentam uma gama de capacidade de 700 a 920 toneladas por hora no caso do SANDVICK e 685 965 toneladas por hora no caso do fragmentador da marca METSO.

Aumentando agora a capacidade para 1500 toneladas hora, a plataforma reporta que a escolha, dado a capacidade e regulação, deveria passar pela seleção de um fragmentador de cones. Esta configuração garante ao utilizador a melhor solução para os dados introduzidos.

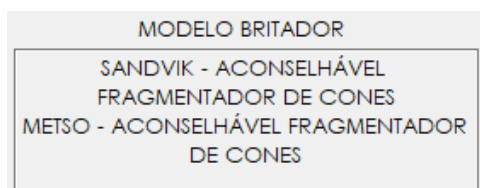


Figura 5.5 – Modelo de fragmentador aconselhado (Fragmentadores de Maxilas)

No caso dos fragmentadores de cones foi realizado o mesmo procedimento mantendo uma regulação de 180 mm com a capacidade de 1500 toneladas por hora, a plataforma reporta a escolha de um fragmentador SANDVIK CG810i e o fragmentador METSO MK-II (42-65).



Figura 5.6 – Modelo de fragmentador aconselhado (Fragmentadores de Cones)

5.2. MOINHOS

Para realizar a validação da plataforma foi realizado o dimensionamento teórico de um moinho de bolas e um moinho de barras, comparando, posteriormente os dois dimensionamentos. Para iniciar o dimensionamento do moinho de bolas foram utilizados como parâmetros de entrada uma capacidade de 75 toneladas hora, com um k80 da alimentação (F) de 12000 micron, um calibre k80 do produto (P) de 150 micron e um Work Index de 7,9 Kilowatt hora por tonelada curta.

ENTRADAS	
Capacidade (t/h)	Wi (kWh/t curta)
75	7,9
Calibre k80 Alimentação (microns)	<input type="checkbox"/> Moagem a seco
12000	<input type="checkbox"/> Circuito aberto
Calibre k80 P. Final (microns)	<input checked="" type="checkbox"/> Partículas Grandes na alimentação
150	

Figura 5.7 – Parâmetros de entrada (Moinho de Bolas)

Com o início da plataforma os resultados obtidos revelam-se bastante satisfatórios pois assemelham-se ao dimensionamento teórico realizado. Com os dados discriminados podemos observar que a plataforma selecionou o moinho com um diâmetro 3,05 e com o comprimento de 3,05 metros. A potência total requerida é de 473,73 kW e após a aplicação dos fatores de correção essa mesma potência sofre uma correção para 464,98 kW.

Dado que a plataforma encontrou um moinho padrão com potência necessária para satisfazer as condições iniciais, o número de moinhos necessário é de dois. A plataforma termina o dimensionamento com o cálculo da relação L/D com o resultado de 1,27.

RESULTADO	
Diâmetro (m)	Comprimento (m)
3,05	3,87
Potência Total (KW)	Potência Corrigida (KW)
473,74	464,98
Número de moinhos	Relação L/D
2	1,27

Figura 5.8 – Resultados obtidos (Moinho de Bolas)

A mesma rotina de dimensionamento foi aplicada aos moinhos de barras, onde os parâmetros de entrada utilizados foram os mesmos. Considerou-se também que a alimentação era proveniente de um circuito de britagem em circuito fechado.

Os resultados obtidos apresentam-se concordantes com o dimensionamento teórico realizado. A plataforma fez uma seleção do moinho padrão com 3,20 metros de diâmetro e 4,57 metros de comprimento, com uma potência de 486 KW. A relação L/D foi de 1,35 com a utilização de dois moinhos.

RESULTADO

Diâmetro (m)	Comprimento (m)
3,20	4,31
Potência Total (KW)	Potência Corrigida (KW)
473,74	458,11
Número de moinhos	Relação L/D
1	1,35

Figura 5.9 – Resultados obtidos (Moinho de barras)

5.3. CRIVOS

Com o intuito de testar o dimensionamento dos crivos foi realizado um dimensionamento com os dados seguintes:

ENTRADAS			
Posição do deck	Malha (mm)	Capacidade (t/h)	% Undersize
1	25	150	80
			Humidade
			-3
Densidade sólido	Fator S	Forma da partícula	Eficiência
2,7	1	Cúbica	90
Tipo de crivo			Forma de abertura
Inclinado c/ Vibração Linear			Quadrada

Figura 5.10 – Parâmetros de entrada (Crivos)

Com as entradas apresentadas anteriormente foi obtido o resultado de um crivo com área de 1,59 m². Este resultado apresenta-se bastante plausível, pois contrasta com o dimensionamento teórico realizado.

RESULTADO
Área do Crivo (m ²)
1,59

Figura 5.11 – Resultados obtidos (Crivos)

5.4. HIDROCICLONES

Para realizar o dimensionamento foi considerado um circuito de moagem, onde o intuito era realizar a seleção do tamanho e do número de hidrociclones necessário para satisfazer as necessidades. Para isso foram utilizados os dados da Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Dados de entrada na plataforma (Hidrociclones)

Parâmetros de entrada	
Capacidade (t/h)	250
Produto	60 % passados a 74 microns
% sólidos do produto	40
Densidade do sólido	2,9
Carga circulante estimada	225
% sólidos do <i>underflow</i> (estimada)	75

ENTRADAS

Capacidade (t/h)	Carga Circulante (%)	Densidade
250	225	2,9
% Passados	% Sólidos produto	
60,0	40	
Malha (micron)	% Sólidos underflow (estimado)	<input checked="" type="checkbox"/> Pressão (kPa)
74	75	50

Figura 5.12 – Parâmetros de entrada (Hidrociclones)

Procedendo ao início do dimensionamento, a plataforma realiza todos os balanços de massas e obtêm todos os fatores necessários.

BALANÇO DE MASSAS				FATORES
	Overflow	Underflow	Alimentação	Fator multiplicação
Caudal mássico (t/h)	250,00	562,50	812,50	2,08
% Sólidos	40,00	75,00	59,09	D1 4,10
Caudal água (m3/h)	375,00	187,50	562,50	D2 1,09
Caudal mássico de polpa (t/h)	625,00	750,00	1375,00	D3 0,93
Caudal volumetrico de polpa	461,21	381,47	842,67	D50c 153,92
Densidade da polpa	1,36	1,97	1,63	d50(basico) 36,82
% Sólidos em volume	18,69	50,85	33,25	

Figura 5.13 – Balanço de massas e fatores (Hidrociclones)

Com os dados obtidos e os fatores encontrados a plataforma apresenta agora os resultados finais do dimensionamento.

RESULTADO	
Caudal Ciclone (m3/h)	Diâmetro Ciclone (cm)
156,54	51
Número de Ciclones	Diâmetro Apex (cm)
6	9,8

Figura 5.14 – Resultados obtidos (Hidrociclones)

Os resultados obtidos revelam-se bastante satisfatórios pois apresentam os mesmos resultados, com poucas variações, do dimensionamento teórico. Os resultados obtidos por intermédio do dimensionamento teórico são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultados obtidos através do dimensionamento teórico (Hidrociclones)

Resultados obtidos	
Caudal ciclone (m ³ /h)	155
Diâmetro hidrociclone (cm)	51
Número de ciclones	6
Diâmetro <i>apex</i>	9,5

5.5. DECANTADORES

No que respeita ao dimensionamento dos decantadores, foram inseridos na plataforma os dados da Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Dados de entrada na plataforma (Decantadores)

Parâmetros de entrada	
Diluição inicial	7
Diluição final	1,07
Altura inicial (cm)	34
Altura final (cm)	26,14
Tempo inicial (min)	0
Tempo final (min)	50

Na Figura 5.15 encontram-se representados os parâmetros de entrada colocados na plataforma.

Figura 5.15 – Parâmetros de entrada (Decantadores)

Com o início do dimensionamento através do botão, foram obtidos os seguintes resultados, Figura 5.16.

Figura 5.16 – Resultados obtidos (Decantadores)

Com os resultados acima mencionados, verifica-se uma correlação entre o dimensionamento teórico e o dimensionamento realizado pela plataforma.

6

CONCLUSÃO

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho incidu no desenvolvimento de uma plataforma informática, tendo como ponto de partida diferentes dimensionamentos dos equipamentos apresentados.

Inicialmente realizou-se uma pesquisa bibliográfica de todos os equipamentos que seriam alvo de dimensionamento. Esta pesquisa concentrou-se nas particularidades de cada equipamento, garantindo uma melhor preparação para a fase seguinte, o dimensionamento teórico.

Durante a fase do dimensionamento teórico, foram demonstradas as formas de dimensionamento que são realizadas através de gráficos padrão, garantindo a sua aplicação durante a implementação na plataforma.

Por conseguinte, na fase de implementação da plataforma foi abordada a linguagem de programação utilizada, assim como o ambiente gráfico gerado. Nesta etapa, foram ainda realizados vários ajustes a retas padrão, possibilitando uma maior versatilidade e simplicidade na sua implementação no software desenvolvido.

Na fase final, foram realizados vários dimensionamentos de cada equipamento introduzido ao nível da ferramenta desenvolvida, tendo sido esta testada através da introdução de variadas soluções de entrada. A sua verificação foi então realizada pela comparação com o dimensionamento teórico do equipamento.

Com o procedimento resumido acima, salienta-se a simplicidade adquirida através deste software, capacitado de apresentar variadas soluções no decurso do processo de dimensionamento, de forma simples, rápida e intuitiva.

Do ponto de vista de benefício para o utilizador, a maior vantagem que se poderá daqui retirar será uma poupança de tempo significativa, em termos de trabalho, o que acarreta consigo uma maior produtividade, associada também a um trabalho assegurado com maior precisão e menor margem para eventuais falhas nos dimensionamentos.

Assim, conclui-se que a plataforma desenvolvida pode vir a evidenciar-se como uma ferramenta de eficácia não desprezível, numa era em que a tecnologia se apresenta com um crescimento exponencial.

6.2. PERSPETIVAS FUTURAS

Uma plataforma informática representa um trabalho contínuo, onde é constantemente melhorada e corrigida, possibilitando uma continuidade no futuro.

Com o intuito de tornar a plataforma mais robusta e abrangente, seria interessante introduzir mais marcas e modelos de equipamentos, possibilitando o aumento do repositório já implementado, o que se refletiria numa maior gama de soluções passíveis de serem selecionadas.

Uma outra introdução na plataforma passaria pela implementação de uma comunicação entre equipamentos, possibilitando a formação de um circuito de preparação de minérios. Desta forma, os dados gerados permitiriam ao utilizador obter várias soluções de equipamentos, que com esta atualização trabalhavam juntos e dependentes entre si.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arterburn, R. A. (1882). *The sizing and selection of hydrocyclones Em: Design and Installation of Comminution Circuits*. New York: SME of AIME.
- Beraldo, J. L. (1987). *Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares*. São Paulo: Edgard Blucher Ltda.
- Gasos, P., Perea, C. P., & Jodra, L. G. (1957). *Métodos de calculo de espesadores por ensayos discontinuos*. Madrid: Junta de energia nuclear.
- Gupta, A., & Yan, D. (2006). *Mineral Processing Design and Operation* (1st Edition ed.). Australia: Elsevier Science.
- Leite, M. R. M. (1986). *Fragmentação e classificação de rochas e minérios*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Metso. (2014). *Crushing and Screening Handbook* (6th edition ed.): Metso Mining and Construction.
- Sharp, J. (2015). *Microsoft Visual C# Step by Step* (8th Edition ed.). Washington: Microsoft Press.
- Testut, R. J. (1958). *La Preparation des Minerais (première partie)*: SIM.
- Will's, B. (2006). *Will's Mineral Processing Technology* (7 ed.): Elsevier Science & Technology Books.